

< 논 문 >

석탄-물 슬러리 액적의 증발 및 점화현상 해석

안국영* · 백승욱** · 김관태***

(1995년 4월 15일 접수)

Ignition and Combustion Phenomena of a Coal-Water Slurry Droplet

Kook-Young Ahn, Seung-Wook Baek and Kwan-Tae Kim

Key Words : Coal-Water Slurry Droplet(석탄-물 슬러리 액적), Evaporation(증발), Ignition Delay(점화지연), Radiative Heat Transfer(복사열전달), Volatiles(휘발성분)

Abstract

The ignition and combustion characteristics of CWS droplets were investigated in the post-flame region generated by a flat flame burner. The effect of radiation by screen and heating elements was taken into account. Also, the theoretical calculations considering the temporal temperature variation have been performed and compared with experimental results. The ignition delays were reduced by the radiation of the screen or heating elements. Therefore the radiation was considered to play some role in predicting the ignition delay.

1. 서 론

석탄슬러리 액적은 석유와 취급의 유사성 때문에 석유 대체에너지로서 중요하게 인식되어지고 있으며, 석유계의 연료와 비슷한 방법으로 분무연소 시키는 것이 가능하여 종래의 중유사용 연소장치를 최소한 개조하여 사용할 수 있다는 이점이 있다. 따라서 석탄슬러리 액적의 연소에 관한 연구가 활발히 진행되고는 있으나 혼합되는 연료의 종류 또는 연소 및 열전달기구에 대한 해석 방법이 다양하여 아직 체계화되지 못하고 있으며 논란의 여지도 많다.

CWS 액적에 관한 연구로써, Yao와 Liu⁽¹⁾는 CWS 액적의 가열 및 연소에 대한 기본적인 특성을 고온 분위기 하에서 실험적으로 정리하였는데, 이들은 탄종, 액적의 크기, CWS 액적중의 석탄

중량비 및 주위가스의 온도, 속도 등에 따른 영향을 체계적으로 보고하였다. Fu 등⁽²⁾은 O₂-Ar 분위기 하에서 단일 CWS 액적의 증발 및 점화현상을 이론적으로 계산한 후 실험과 비교하였는데, 이들의 연구에서는 액적 내부의 온도는 균일하고 점화가 일어날 때까지 액적 지름의 변화는 없고 다만, 액적은 다공질의 형태를 갖고 있다고 가정하였다. Antaki⁽³⁾는 슬러리 액적내의 액체성분이 증발하면서 증발면이 줄어들게 되어 증발면 바깥쪽은 다공질의 고체성분이 남게되고, 증발면 내부는 고체 및 액체성분이 공존하는 슬러리상태로 유지되어 있다고 생각하여 액적의 증발현상을 이론적으로 해석하였다. 그러나, 이들은 증발면 바깥쪽의 온도는 액적내의 액체성분의 증발온도와 같다고 가정하였다. Kolb 등⁽⁴⁾은 CWS 액적의 점화에 미치는 대류열전달에 대한 복사열전달의 영향을 규명하기 위하여 Walsh 등⁽⁵⁾이 제시한 점화모델을 이용하여 분사되는 액적 및 단일 액적에 대하여 계산 및 실험을 실시하였다. 이들은 적용된 실험조건 하에서는 대류 열전달에 의한 영향이 지배적이었으나, 액적 크기

*회원, 한국기계연구원 열유체시스템연구부

**회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

***한국기계연구원 열유체시스템연구부

가 증가하게 되면 복사열전달의 영향도 증가하게 될 것으로 예측하였으며, 단일 액적의 경우가 분사된 액적군의 경우보다 복사열전달의 영향이 클 것이라고 보고하고 있다.

Cho 등⁽⁶⁾은 슬러리 액적의 연소현상을 증발, 다공성 석탄형성 및 파열의 세 단계로 나누어 부풀어 오름과 줄어듦 현상을 이론과 실험으로 관찰하였고, Lee와 Law⁽⁷⁾는 실험을 바탕으로 부풀어오름과 줄어듦 현상에 대하여 d³-모델이라는 증발모델을 제시하였으며, Yao와 Manwani⁽⁸⁾는 CWS 액적에 기름을 섞은 CWOS 액적에 대한 파열 등의 연소현상을 관찰하였다.

국내의 경우 김 등⁽⁹⁾은 CWS 액적의 제조 및 적용을 위한 연구를 수행하였으며, 채 등⁽¹⁰⁾과 안 등⁽¹¹⁾은 평면 화염버너 상단의 고온가스를 이용하여 CWS 액적의 증발 및 점화현상을 실험적으로 고찰하였다.

이와 같이 CWS 액적에 관한 연구는 실험을 바탕으로 한 이론적 연구가 병행되어지고 있으나, 아직 증발 및 점화 등의 연소현상에 대한 명확한 이해가 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 CWS(Coal-Water Slurry)연료의 단일액적을 대상으로 액적의 연소특성을 체계적으로 규명하기 위하여 실험장치를 설계 제작하여 일련의 실험을 수행하였으며, 이를 이론모델과 비교하였다. 또한, 주위분위기조건에 따라 열전달 모드가 액적에 미치는 영향을 평가하였으며, 이와 같은 결과는 신 연료의 연소특성 해석 및 산업용 요로 등의 설계에 기초자료를 제공하게 될 것이다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험장치 및 실험조건

CWS 액적의 증발, 점화 및 연소현상을 해석하기 위하여 사용된 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 평면 화염버너 및 전열판을 이용하여 액적 지지대 또는 열전대에 매달린 액적을 가열하고, 이때 화상처리장치, VTR, 복사온도 측정장치 및 데이터 처리장치 등에 의하여 액적의 연소과정을 감시할 수 있도록 하였다.

한편, 버너 상단에는 서로 다른 크기의 스테인리스망을 설치하여 공급가스의 유량이나 조성을 변화시키지 않고 연소가스 흐름의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 이 때 스테인리스망은 고온가스에 의

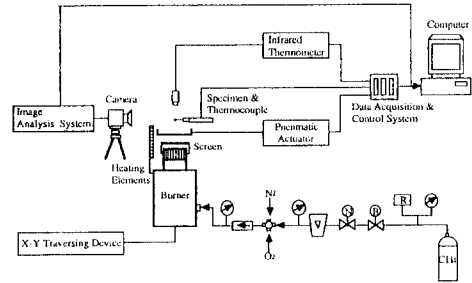


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

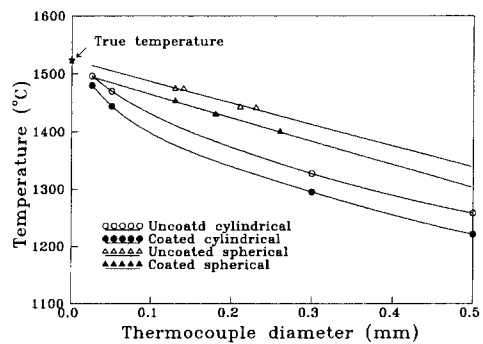


Fig. 2 Gas stream temperature as function of thermocouple diameter and shape of junction for C1 condition

하여 가열되어 복사열을 발하게 되며, 이 복사열은 고온가스의 유동과 함께 액적연소에 영향을 미치게 되나, 스테인리스망의 설치에 의하여 고온가스의 온도가 현저히 떨어지므로 본 연구에서는 별도의 전열판을 설치하여 고온가스 유동의 변화없이 전열판에 의한 복사열전달의 영향을 관찰할 수 있도록 하였다.

버너 상단의 고온가스 및 연소 중의 액적의 온도를 측정하기 위한 열전대는 미국 OMEGA사의 R-type 열전대(Pt/Pt-13%Rh)로서, 액적의 온도를 측정하는 경우 직경이 25 μ m 또는 50 μ m인 열전대의 접점을 아세틸렌 용접하여 사용하였으며, 접점의 지름은 150 μ m이하를 유지하도록 하였다. 버너 상단의 고온가스의 온도는 열전대로부터 측정된 온도 값에 대한 복사열손실, 열전도 및 촉매작용에 의한 오차 등을 보정하기 위하여, 기존의 연구자^(12,13)와는 달리 Fig. 2에서 보는 바와 같이 서로 다른 지름을 갖는 열전대로부터 얻은 온도 값을 이용하여 열전대의 지름이 "영"으로 될 때의 온도를 보상 값으로 취하였다.

이때, 열전대는 버트 용접에 의한 원통형 또는 아세틸렌 용접에 의한 구형을 갖도록 하였으며, 열전대의 코팅에는 MgO를 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 열전대 접점이 구형인 경우가 원통형인 경우 보다 온도가 높게 나타나고 있으며, 열전대 접점의 지름이 클수록 온도는 현저히 낮게 나타나고 있다. 또한, 열전대 접점부에 코팅을 한 경우는 열전대 선의 촉매작용을 방지하여 온도가 다소 낮게 나타나고 있다. 그러나, 각각의 곡선을 외삽하여 얻은 열전대 접점의 크기가 “영”으로 될 때의 온도 값은 약 20 °C 정도의 차이를 보이며 잘 일치하고 있다.

평면 화염버너 상단의 고온가스의 축방향속도는 레이저 도플러 유속계(LDV ; TSI model 9100-12)를 사용하여 측정하였다. 실험에 사용된 산란입자는 0.22 μm의 균일한 지름을 갖는 TiO₂로서 버너로 공급되는 가스배관 중에 입자 발생기를 연결하여 공급하였으며, 화염이 있는 경우는 연소에 의하여 연소가스의 체적이 팽창하기 때문에 상대적으로 입자의 농도는 미연가스와 비교하여 적어지므로 보다 많은 입자를 필요로 하였다.

고온가스의 농도는 단일단계 반응이 일어난다고

가정하여 구하였다. 초기 액적의 크기는 CCD 카메라로부터 확대되어 화상처리장치(영국 Cambridge사 Quantimet 520)에 의하여 측정되어지며, 이때 CCD 카메라로부터의 신호는 VTR에 녹화, 재생되므로 액적의 점화 등의 연소과정을 감시할 수 있도록 하였다.

본 연구에 사용된 석탄으로는 비교적 연소성이 우수한 핑쇼탄(중국산)을 분쇄하여 200메쉬(mesh)에서 90% 통과한 것을 사용하였으며, 물성 값과 원소분석 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다.

CWS 액적은 중량비로 미분탄 60%, 물 40%에 유동의 안정화를 위하여 소량의 유동화제(중량비로 석탄의 0.5%)를 첨가하였다.

실험조건은 Table 3에서 보는 바와 같이 당량비를 0.5로 하고 주위가스의 온도 및 속도를 변화시켰으며, 이때 스테인리스망 또는 전열판이 설치된 경우에는 복사온도계 및 열전대에 의하여 스테인리스망 및 전열판의 방사율 및 온도를 측정하였다.

Table 3에서 C1, C2 및 C3는 버너 상단에 스테인리스망 또는 전열판이 설치되어 있지 않은 경우로서 온도 및 속도는 버너 상단에서 25 mm되는 지점에서 측정하였다. S1과 S2는 버너 상단에 스테

Table 1 Properties of coal used

Item	Coal species					
	Pingshou coal					
Proximate analysis (%)	Moisture		Ash	Volatile matter		Fixed carbon
	4.1		12.0	33.7		50.2
Ultimate analysis (%)	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulfur	Oxygen	Ash
	69.03	4.36	0.35	0.71	13.04	12.51
Heating value	6,180 kcal/kg					
True density	1,444 g/cc					
Ash fusibility (C)	Initial deformation temperature		Hemispherical temperature		Fluid temperature	
	1,280		1,660		1,680	

Table 2 Chemical analysis of ash

Constituent	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
Pingshou coal	39.70	42.20	1.41	10.34	0.23	0.05	0.03	1.74	0.61	1.82

Table 3 Summary of experimental conditions

Case	Equivalence ratio of gas mixture	T_g [°C]	v_g [m/s]	Remark
C1	0.5	1524	0.91	
C2	0.5	1524	0.99	
C3	0.5	1320	0.80	
S1	0.5	981	0.71	$T_s=1007^\circ\text{C}$
S2	0.5	957	1.03	$T_s=1007^\circ\text{C}$
H1	0.5	1320	0.80	$T_h=711.4^\circ\text{C}$
H2	0.5	957	1.03	$T_h=711.4^\circ\text{C}$

인리스망을 설치한 경우로서 온도 및 속도는 S1의 경우는 스테인리스망으로부터 13 mm 지점에서, S2의 경우는 25 mm 지점에서 측정하였다. H1과 H2는 버너상단에 전열판이 설치된 경우로서 전열판이 설치되어 있는 것을 제외하면 H1은 C3, H2는 S2 조건과 동일하다.

2.2 실험방법

버너 출구의 예혼합가스가 착화되어 화염이 안정화되면 버너 상단에 위치하여 버너화염으로부터 액적을 차단하고 있던 차단막(세라믹 내화물)은 공기압장치에 의하여 후퇴하게 되고, VTR 녹화에 사용되는 초시계는 액적이 고온가스에 노출됨과 동시에 작동을 시작하게 된다. 전열판이 버너 상단 좌우에 설치되는 경우에는 실험 전에 버너화염 또는 전열판과 액적의 차단을 위하여 차단막을 설치하는 것이 곤란하므로 평면 이송장치에 의하여 버너를 액적이 매달린 위치로 이동되도록 하였다.

CWS 액적이 버너의 고온가스 분위기에 노출되면 VTR 녹화와 동시에 10 msec 간격으로 시간-온도곡선을 데이터 처리장치에 의하여 컴퓨터에서 취득하게 되고, 실험시작 후 20초가 경과하면 공기압장치에 의하여 차단막을 전진시켜 화염으로부터 액적을 차단하고 초시계를 정지시킨 후 실험을 종료한다.

초기 액적지름 및 시간의 변화에 따른 액적의 크기, 점화시간, 가시화염의 소멸시간 등은 VTR의 약 1/32초의 간격으로 조그셔틀이 가능한 재생신호를 화상처리장치에 입력하여 측정하였으며, 경우에 따라서는 실험도중 차단막을 전진시켜 화염으로부터

터 액적을 차단시킨 후 이때의 액적의 크기를 측정하여 보았다.

3. 이론 모델

이론 모델은 Ahn 등⁽¹⁴⁾이 제시한 모델을 이용하였으며, 이 모델의 물리적 의미는 다음과 같다. 초기에 일정한 온도로 유지되어 있는 CWS 액적이 고온가스 분위기에 노출되면 액적은 가열되고 이때 액적의 표면온도가 물의 증발온도인 100 °C가 되면 액적은 증발을 시작하게 된다. 액적이 증발을 시작하게 되면 액적의 초기 지름 변화는 없이 물의 증발량에 따라 증발면이 액체내부로 이동하게 된다. 이때 증발면 안쪽은 석탄과 물의 혼합상태가 유지되고 증발면 바깥쪽은 석탄이 남게 되며, 증발면 안쪽과 바깥쪽은 증발면을 중심으로 온도구배를 갖

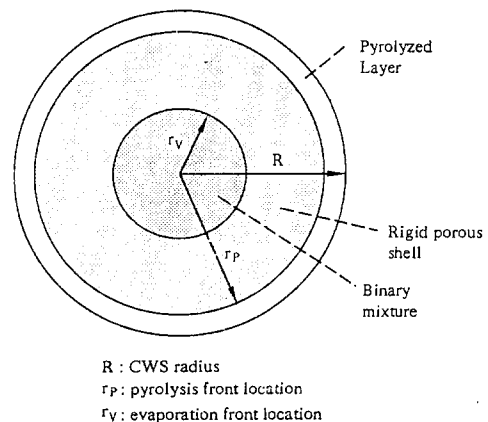


Fig. 3 Mechanism of evaporation and pyrolysis front

게 된다. 이 경우 증발면으로부터 증발된 물이 증발면 바깥쪽 구간에 축적될 가능성이 있지만, 증발면이 이동하는 특성시간이 수증기의 이동(transport of vapor) 특성시간보다 훨씬 크기 때문에 수증기의 축적은 무시하는 것이 물리적으로 타당하다.

이와 같이 증발과정 중에 외부로부터 받은 열은 증발에 쓰여 증발면을 액적 내부로 이동시키고 동시에 증발면 바깥쪽의 석탄부분을 가열시키게 되어, 액적표면의 온도는 상승하게 되고 이때 액적표면온도가

석탄의 휘발온도인 $576.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (850 K)가 되면⁽¹⁵⁾ 휘발과정이 시작된다. 이 경우에도 증발과정과 마찬가지로 휘발면이 액적내부로 이동하게 되어 휘발면 바깥쪽에는 잔탄(char)가 남게 되고 휘발면 안쪽은 석탄상태를 유지하게 된다. 휘발의 개시는 물의 증발이 끝난 후 바로 일어나는 것은 아니고, 주위분위기 조건 및 액적의 물리적 특성 등에 따라 Fig. 3에서 보는 바와 같이 증발과 휘발이 공존할 수도 있고, 물의 증발이 끝난 후에도 휘발이 바로 일어나지 않고 액적표면이 휘발온도에 도달할 때까지 액적이 가열된 후 휘발이 일어나는 경우도 있다.

이와 같은 액적의 가열, 증발 및 휘발과정 중에 가스장의 온도분포와 연료(휘발성분) 및 산소의 질량비도 변화하게 되는데, 휘발과정 중에서 방출된 휘발성분과 산소와의 반응이 증가됨에 따라 가스장의 온도가 주위 가스온도보다 높아지는 구간이 생기게되며, 본 연구에서는 이 때를 점화로 정의하였다.

한편, 휘발과정 중에서도 액적지름의 변화는 없는 것으로 가정하였는데 이는 휘발면이 이동함에 따라 휘발면 바깥쪽의 잔탄성분이 부풀거나 줄어들 현상을 일으켜 액적지름의 변화를 일으킬 수 있으나 휘발 개시 후 점화까지의 시간이 짧아 이 영향을 무시하였으며, 실험으로도 점화직전까지 액적지름의 변화와 부풀음 및 줄어들 현상을 관찰하지 못하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4에는 실험에서 얻어진 시간-온도곡선을 나타내었는데, 액적이 주위 고온가스에 노출되면 액적은 가열을 받게 되고, 액적의 온도가 불의 증발

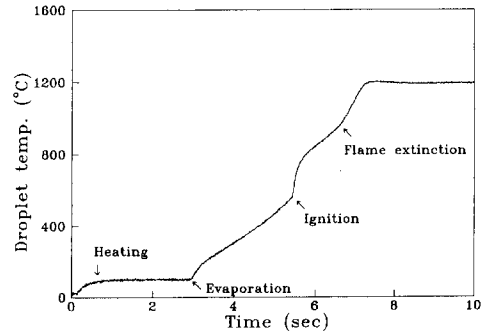


Fig. 4 Combustion processes in the temperature history curve in experiments (S2 condition, initial diameter=1.6 mm)

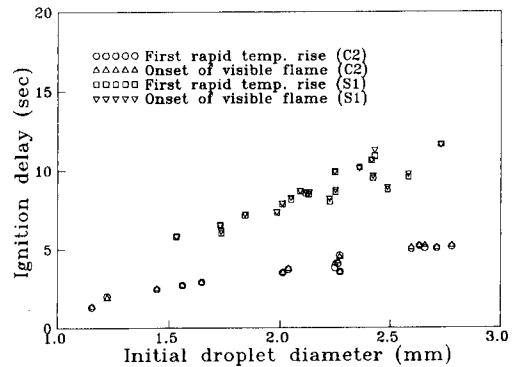


Fig. 5 Comparison of ignition delays for two different definitions of ignition

온도인 약 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도가 되면 온도의 증가 없이 불의 증발이 시작하게 된다.

물의 증발과정이 끝나게 되면, 액적의 온도가 증가하기 시작하다가 어느 순간 급격하게 온도가 다시 상승하게 되는 데, 본 실험에서는 이곳을 점화로 정의하였다.

Fig. 5은 VTR과 시간-온도곡선에서 얻은 점화 지연시간을 비교한 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 두 경우가 잘 일치하므로 점화 기준으로는 어느 경우를 선택하여도 무방함을 알 수 있다.

Fig. 6에는 초기 액적지름에 대한 액적의 증발시간을 계산한 결과중 점화가 발생하기 전에 증발이 모두 일어나는 두 실험조건(S1과 S2 조건; 경우에 따라서는 증발이 채 일어나기 전에도 점화가 발생)에 대하여 실험과 계산 결과를 비교하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 초기 액적지름이 클수록 증발시간이 길어짐을 알 수 있다. 그러나,

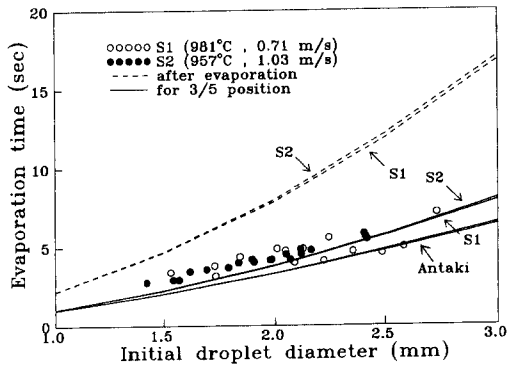


Fig. 6 Comparison of experimental and theoretical evaporation times for two different conditions

이 경우 증발이 모두 일어난 후의 시간을 나타낸 계산결과(점선)는 실험결과와 현저한 차이를 보이게 되는데, 이것은 실험의 경우 열전대가 액적중앙에 위치하는 것이 아니고 액적상부(액적중앙에서 약 3/5지점)에 위치하기 때문에 증발면이 이곳을 지나므로서 열전대에서 나타나는 온도는 증발이 채 일어나기 전에 이미 증발온도를 넘어 온도가 상승하고 있기 때문이다. 따라서, 액적 내에서 열전대가 위치하고 있는 지점의 온도 값이 물의 증발온도를 유지할 때까지의 시간을 나타낸 계산결과(실선)와 실험결과를 비교하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 비교적 잘 일치하고 있다. 또한, Fig. 6에는 Antaki 등⁽³⁾이 제시한 증발모델에 대한 계산결과를 함께 나타내었으며, 본 계산에서의 물의 증발시간(점선)보다 증발시간이 훨씬 짧게 나타나고 있다. 이것은 앞서 언급된 바와 같이 Antaki의 모델이 액적내부의 온도분포를 고려하고는 있으나, 증발면 바깥쪽의 온도분포를 일정하게 가정함으로써 주위로부터 전달되는 모든 열이 물의 증발에 기여하였기 때문이다. 따라서 증발과정 중에는 액적의 표면온도가 증발온도를 유지하기 때문에 액적내의 물이 모두 증발한 후에 액적표면이 가열되어 휘발이 일어나야 하는 모순이 있다.

Fig. 7은 열전대로부터 측정된 온도곡선과 계산으로부터 얻은 액적중심에서 반경방향으로 3/5R 지점의 온도변화를 비교한 것으로 두 경우가 거의 일치하는 것으로 미루어 보아 제시된 계산모델이 타당하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 버너 상단에 스테인리스망 또는 전열판을 설치하지 않은 경우의 초기 액적지름에 대한 점

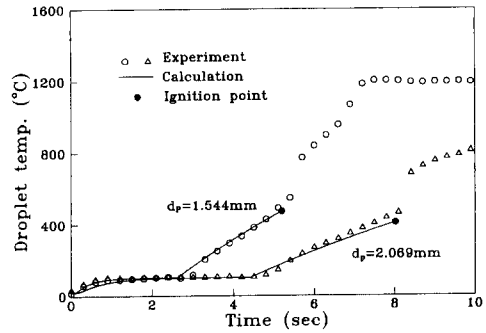


Fig. 7 Comparison of temporal variations of the droplet temperature for S2 condition

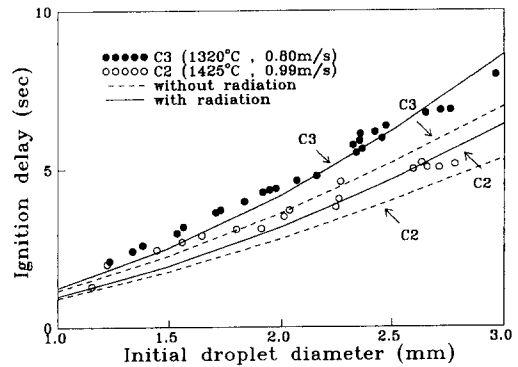


Fig. 8 Comparison of experimental and theoretical ignition delays with/without taking account of radiation when the metal screen and heating elements are not installed

화지연시간을 나타낸 것으로, 액적과 실험 대기 조건(surroundings)에 대한 표면복사를 고려한 경우와 복사를 고려하지 않은 경우를 비교하였다.

그림에서 보는 바와 같이 액적과 대기사이의 표면복사를 고려한 경우가 실험결과와 보다 잘 일치하고 있는 것으로 미루어 보아 액적 표면으로부터의 복사열손실에 의하여 점화지연시간이 길어지고 있음을 알 수 있다. 액적 표면으로부터의 복사열손실량은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 초기 액적지름에 대하여는 일정하나 액적 표면온도가 증가함에 따라 증가하고 있으며, 고온가스에 의한 대류열전달량은 초기 액적지름 및 액적 표면온도가 증가할수록 감소한다.

따라서, 초기 액적지름이 클수록 고온가스에 의한 대류열전달량이 감소되어 점화지연시간이 길어지게 됨을 알 수 있다. 한편, 계산결과에서 초기

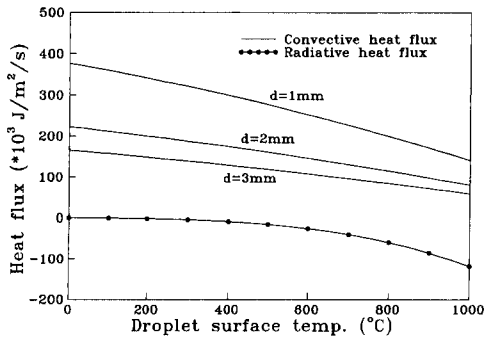


Fig. 9 Convective and radiative heat flux transferred to the droplet when the metal screen and heating elements are not installed

액적지름이 커지면 복사열손실을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 점화지연시간의 차이가 증가하게 되는데, 이것은 초기 액적지름이 큰 경우 대류열전달량이 작아져 상대적으로 복사열손실의 영향이 증가하기 때문이다. 즉, 대류열전달에 대한 복사열전달의 비가 증가할수록 점화지연시간에 복사열전달이 미치는 영향은 증가하게 되고, 이러한 현상은 초기 액적지름이 클 수록 더욱 명확히 나타나고 있다.

Fig. 10은 버너 출구 상단에 스테인리스망을 설치한 경우의 초기 액적지름에 대한 점화지연시간을 나타낸 것으로, 액적과 실험 대기 조건에 대한 표면복사를 고려한 경우 및 액적과 스테인리스망 사이의 표면 복사를 추가하여 고려한 경우를 비교하였다. 이때, 액적과 스테인리스망 사이의 거리가 가까운 S1 조건(13 mm)은 액적으로부터 스테인리스망으로의 형상계수가 0.173, 스테인리스망으로부터 액적으로서의 형상계수는 0.012이며, 액적과 스테인리스망 사이의 거리가 25 mm인 S2 조건의 형상계수는 각각 0.071, 0.005이다. 따라서, 스테인리스망에 의한 복사열전달을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 초기 액적지름에 대한 점화지연시간을 비교하여 보면 그림에서 보는 바와 같이 복사의 영향이 큰 S1 조건이 S2 조건보다 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 경우, 액적이 갖는 정미 복사열전달량은 액적, 실험 대기 조건 및 스테인리스망 사이의 표면복사에 의하여 나타내어지며, 액적의 표면온도가 비교적 낮은 구간에서는 스테인리스망으로부터 전달된 복사열에 의하여 액적이 갖는 정미 복사열전달량은 양의 값을 가지게 되나, 액적

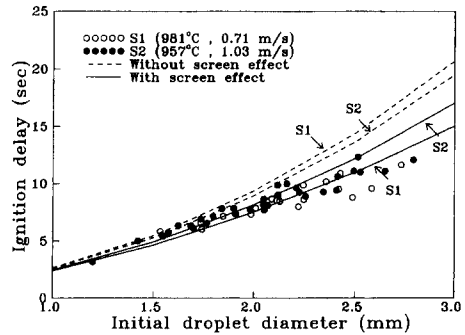


Fig. 10 Comparison of experimental and theoretical ignition delays with/without taking account of radiation by metal screen

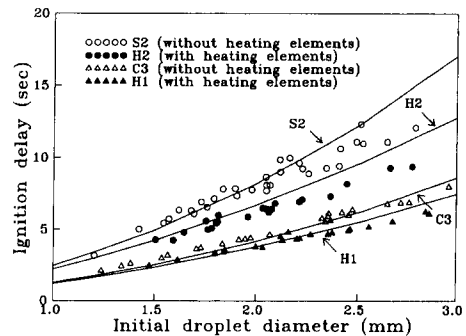


Fig. 11 Comparison of experimental and theoretical ignition delays with/without taking account of radiation by heating elements

의 표면온도가 증가함에 따라 액적의 복사열손실량이 증가하게 되므로 정미 복사열전달량은 점차 감소하여 음의 값을 갖게 된다.

Fig. 11에는 복사열전달이 액적에 미치는 영향을 보다 명확히 이해하기 위하여 버너 출구 상단 좌우에 전열판이 설치된 경우의 점화지연시간을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전열판의 설치에 따라 복사열전달량이 증가하여 점화지연시간은 감소하고 있으며, 초기 액적지름이 클수록 그 영향은 더욱 크게 나타나고 있다. 더욱이, H2 조건의 경우는 고온가스의 온도가 낮아 상대적으로 고온가스에 의한 대류열전달량이 H1 조건보다 적고, 전열판의 온도와 방사율은 H1 조건과 같으나 스테인리스망의 설치에 따라 스테인리스망과 전열판사이의 표면복사에 의하여 이들로부터 액적으로서의 복사열전달이 증가하고 있어 전열판에 의한 복사열전달의 영향이 H1의 경우보다 현저히 증가한다.

5. 결 론

CWS 단일액적에 대한 실험과 이론모델을 비교하여 얻은 액적의 연소특성에 대한 결론은 다음과 같다.

(1) 액적 내부의 온도분포를 고려한 본 연구에서의 연소모델은 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 이 이론모델을 통하여 액적의 연소과정을 보다 명확히 이해할 수 있다.

(2) 액적연소에 영향을 미치는 인자로는 초기 액적지름 및 주위분위기 온도 등을 들 수 있으며, 초기 액적지름이 작을수록 주위분위기 온도가 높을수록 증발 및 점화지연시간은 감소한다.

(3) 점화지연시간은 액적내의 물의 증발과 휘발성분의 형성에 요구되는 가열시간 및 휘발성분의 확산과 주위산소와의 반응시간으로 나타낼 수 있으며, 전자의 경우가 지배적이다.

(4) 버너 상단에 스테인리스망 또는 전열판을 설치한 경우, 액적, 스테인리스망 및 전열판 사이의 표면 복사열전달에 의하여 점화지연시간이 영향을 받을 수 있다.

(5) 고온가스에 의한 대류열전달 및 액적, 스테인리스망, 전열판 등에 의한 복사열전달이 액적연소에 미치는 영향을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 액적이 받는 고온가스에 의한 대류열전달량은 초기 액적지름이 커질수록 감소되어 점화지연 시간이 증가한다.

- 스테인리스망 또는 전열판이 설치된 경우, 초기에는 액적이 이들로 부터 복사열전달을 받아 정미 복사열전달량은 양의 값이 되나 액적의 표면온도가 증가함에 따라 액적의 복사열손실량이 증가하게 되므로 정미 복사열전달량은 점차 감소하여 음의 값을 갖게 된다.

- 이러한 복사열전달의 영향은 고온가스에 의한 대류열전달량이 상대적으로 적은 경우, 즉 고온가스의 온도가 낮거나 초기 액적지름이 큰 경우에 상대적으로 크게 나타난다.

참고문헌

(1) Yao, S. C. and Liu, L., 1983, Behavior of Suspended Coal-Water Slurry Droplets in a Combustion Environment, *Combust. Flame*, 51,

pp. 335~345.

(2) Fu, W. B., Wei, J. B., Han, H. Q. and Zhang, Y. P., 1985, A Study of the Evaporation and Ignition of a Single Coal-Water Slurry (CWS) Droplet, *Comb. Sci. and Technol.*, 43, pp. 67~83.

(3) Antaki, P., 1986, "Transient Processes in a Rigid Slurry Droplet During Liquid Vaporization and Combustion," *Comb. Sci. and Technol.*, 46, pp. 113~135.

(4) Kolb, T., Farmayan W. F., Walsh P. H. and Beer J. M., 1988, "The Contribution of Radiation to the Ignition of a Confined Turbulent Coal-Water Slurry Diffusion Flame," *Comb. Sci. and Technol.*, 58, pp. 77~95.

(5) Walsh, P. M., Zhang, M. C., Farmayan, W. F. and Beer, J. M., 1984, "Ignition and Combustion of Coal-Water Slurry in a Confined Turbulent Diffusion Flame, Twentieth Symposium (International) on Combustion," *The Combustion Institute*, Pittsburgh, pp. 1401~1407.

(6) Cho, S. Y., Takahashi, F. and Dryer, F. L., 1989, "Some Theoretical Consideration on the Combustion and Disruption of Free Slurry Droplets," *Comb. Sci. and Technol.*, 67, pp. 37~57.

(7) Lee, A. and Law, C. K., 1989, "Gasification and Shell Characteristics in Slurry Droplet Burning," *AIAA/ASME/SAE/ASEE 25th Joint Propulsion Conference*, Monterey, CA, pp. 1~17.

(8) Yao, S. C. and Manwani, P., 1986, "Burning of Suspended Coal-Water Slurry Droplet with Oil as Combustion Additive," *Combust. Flame*, 66, pp. 87~89.

(9) 김동찬 외 8인, 1988, "CWM연료의 현장적용을 위한 연소실험연구," 한국동력자원연구소 연구보고서, KE-88-14.

(10) 체재우, 조용철, 전영남, 한영수, 1992, "석탄-물 혼합물 단일액적의 연소 특성에 관한 실험적연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제11호, pp. 2159~2168.

(11) 안국영, 백승욱, 김관태, 1993, "CWS 액적의 증발 및 점화에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1246~1252.

(12) Kaskan, W. E., 1957, "The Dependence of Flame Temperature on Mass Burning Velocity,"

- Sixth Symposium (International) on Combustion*,
The Combustion Institute, Reinhold, New York,
pp. 134~143.
- (13) Becker, H. A. and Yamazaki, S., 1978,
“Entrainment Momentum Flux and Temperature
in Vertical Free Turbulent Diffusion
Flames,” *Combust. Flame*, 33, pp. 123~149.
- (14) Ahn, K. Y., Baek, S. W. and Choi, C. E., 1994,
“Investigation of a Coal–Water Slurry Droplet
Exposed to Hot Gas Stream,” *Combust. Sci. and
Technolo.*, Vol 97, pp. 429~447.
- (15) Phuoc, T. X. and Mathur, M. P., 1991, “Tran-
sient Heating of Coal Particles Undergoing
Pyrolysis,” *Combust. Flame*, 85, pp. 380~388.