

〈論 文〉

## CWS액적의 증발 및 점화에 관한 실험적 연구

안국영\* · 백승욱\*\* · 김관태\*\*\*

(1992년 6월 23일 접수)

### An Experimental Study on the Evaporation and Ignition of CWS Droplets

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

**Key Words :** Evaporation (증발) Ignition Criterion (점화기준) Radiative Heat Transfer (복사 열전달) Volatiles (휘발성분)

#### Abstract

Coal-Water slurry (CWS) is a new potential form of fuel for use in power plants and industrial furnaces. The evaporation and ignition characteristics of CWS have been studied in the post-flame region generated by a flat flame burner. Individual droplets with initial diameters of 1~3 mm were supported around the thermocouples and rapidly exposed to a hot gas stream. The gas temperature ranged between 950°C and 1600°C at atmospheric pressure. The effect of droplet size, gas temperature and radiative heat transfer by screen were studied experimentally. The ignition criterion was either a rapid temperature rise in time-temperature curves or onset of visible flame in experiment. Increasing the gas temperature or decreasing the droplet size reduced the time required for evaporation and ignition.

#### 1. 서 론

액적연소는 액주 또는 액막이 불안정성에 의하여 부서지면서 이루어지는 작은 액적의 연소현상을 다루는 것으로, 연료와 기체상태의 공기가 혼합되어 2상 유동문제를 수반하고 그로인해 주위 기체와의 사이에 질량, 운동량 및 에너지의 상호교환에 의하여 복잡한 유동장 및 열적특성을 가지므로 이를 해석하기 위하여는 적절한 모델링이 요구되고 있다. 최근에는 컴퓨터 및 계측 기술의 발달로 인하여 액적연소를 비롯하여 연소현상을 규명하기 위한 연구가 활발히 진행되고는 있으나 액적의 연소기구 및

열전달 현상들에 관한 정량적인 보고는 그리 많지 않다.

한편, 액적연소의 응용은 연소실설계, 자동차 및 항공기 엔진, 연소기기 개발 등 거의 모든 연소시스템에 걸쳐 활용의 폭은 넓으며, 어떤 의미에서는 연소 관련시스템의 기초연구의 일익을 담당하는 분야로서, 최근 신연료의 개발이 활발히 진행됨에 따라 연소특성해석을 위한 실험장치 및 실험기법 개발이 절실히 요구되고 있다.

액적연소에 관한 연구는 1950년대에 Godsave<sup>(1)</sup>, Spalding<sup>(2)</sup>, Goldsmith와 Penner<sup>(3)</sup> Wise 등<sup>(4)</sup>에 의하여 연구가 시작되었는데, 이들의 연구는 액적지름의 제곱이 시간에 따라서 감소한다는  $d^2$ -법칙에 근간을 두고 있다.

그 후 많은 연구자들에 의하여  $d^2$ -법칙을 규명하기 위한 연구가 진행되었으며, 한편으로는 주위

\*정회원, 한국기계연구원 연소·전열연구실

\*\*정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\*\*한국기계연구원 연소·전열연구실

분위기 조건등을 변화시켜가며 액적에 미치는 영향을 평가하는 연구로 발전 되었다.

이와 같은 액적연소는 사용연료에 따라 각각 달리 적용되었는데, 석탄과 탄소에 관한 연구는 Essenhigh<sup>(6)</sup>, Mulcahy<sup>(6)</sup>, Field<sup>(7)</sup> 및 Smoot와 Pratt<sup>(8)</sup>등에 의하여 시작된 후 다른 많은 연구자들<sup>(9)~(14)</sup>에 의하여 발전되었다.

본 연구에서는 CWS 액적을 대상으로 주위 분위기 조건등에 대하여 점화등의 연소현상을 평가하기 위한 실험장치를 구성하고 일련의 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 및 실험방법

### 2.1 실험대상 액적

액적은 액체, 고체 및 슬러리 형태로 대별할 수 있으며 각각의 경우 해석방법이 다소상이하고, 같은 형태의 경우에도 연료 고유의 특성에 따라 서로 다른 해석방법이 제시되기도 한다.

본 연구에서는 취급의 유사성때문에 석유 대체에너지로서 중요하게 인식되고 있는 석탄 슬러리를 실험대상 액적으로 선정하였다.

실용화가 가능한 석탄 슬러리 형태로는 COS

(coal-oil slurry) 및 CWS (coal-water slurry) 등을 들 수 있으며, COS의 경우는 1974년경부터 연구가 본격화 되어 1980년대 초에는 실용화가 가능할 것으로 전망되었으나, 오일의 가격인하(석탄: 오일의 중량비 50:50, 열량비 30:70정도로 오일 대체성이 낮고 경제성이 크지 않은 것으로 평가)로 전량 석탄으로 대체가 가능한 CWS로 연구가 전환되었다.

CWS 기술개발은 1981년 DOE 후원하에서 개최된 CWS R&D에 관한 워크샵에서 필요성이 강조되었고, 그 후 연구가 진행되어 제조 및 연소특성등의 연구결과가 보고되고는 있으나, 연소특성에 대한 정량적인 결과보고는 미비한 실정이다.

일반적으로 CWS는 중량비로 미분탄 60~70%, 물 30~40%의 비로 구성되어 있으며 미분탄의 종류나 물이 차지하는 중량비 등에 따라 서로 다른 연소특성을 갖는다는 보고가 있다. 실험대상 액적은 국내의 화력발전소 등에서 주로 사용되고 있는 미분탄(평소탄)에 물을 섞은 CWS로서(중량비로 6:4), 유동의 안정화를 위하여 소량(중량 비로 Coal의 0.5%)의 유동화제를 첨가하였다.

미분탄이 무연탄일 경우는 CWS와 같은 석탄 슬러리로의 제조는 실용화가 어렵고, 어느 정도 이상

Table 1 Properties of fuel coal

Coal Species Item	Pingshuo Coal					
	Proximate Analysis (%)	Moisture		Ash	V.M.	F.C.
	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					
Ture Density	1.444 g/cc					
Ash Fusibility	I.D.T.		H.T.		F.T.	
	1,280		1,660		1,680	

Table 2 Chemical analysis of fuel coal

Constituent Coal Species	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
Pingshuo Coal	39.70	44.20	1.41	10.34	0.23	0.05	0.03	1.74	0.61	1.82

발열량을 갖는 유연탄일 경우가 CWS로써의 실용화가 적합하다. CWS연료용으로서의 타당성 여부를 판단하는데는 연료의 연소성, 고농도화 특성, 회분의 장해성 및 석탄의 물성분석값등이 기준으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 미분탄으로서 비교적 연소성이 우수한 핑소탄을 사용하였으며, 물성값과 원소분석 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다.

2.2 실험 장치

액적의 증발, 점화 및 연소현상을 해석하기 위하여 사용된 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 평면 화염 버어너의 고온가스를 이용하여 열전대에 매달린 액적을 가열하고, 이때 화상처리장치, VTR 및 데이터 처리장치 등에 의하여 액적의 연소과정을 감지할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 평면 화염 버어너는 혼합부 및 노즐부로 구성되어 있으며, 노즐부는 내경 30 mm 및 40 mm의 원통내부에 내경 0.8 mm, 길이 30 mm의 스테인레스관을 채워 노즐부 상단에서 연소가스의 흐름이 층류가 되도록하여 화염대 상부 온도분포가 연소가스 중심부에서 반경방향으로 일정하게 유지되도록 하였으며, 버어너 화염의 안정화를 위하여 화염부위에 내경 40 mm의 세라믹 내화물 원통을 설치하였다.<sup>(15)</sup>

예혼합되는 가스는 메탄(CH<sub>4</sub>), 질소(N<sub>2</sub>) 및 산소(O<sub>2</sub>)로서, 가스분배로부터 압력조절기, 압력계, 니들밸브, 유량계 및 체크밸브등을 거쳐 Fig. 1에서 보는바와 같이 버어너로 공급되며, 이 때 유량계는 유막 유량계를 사용하여 보정하였다.

주위 고온가스의 온도 및 연소과정중의 액적의 온도는 직경 50 μm의 R-type 열전대로 측정하였으

며, 열전대는 온도 측정에 사용되는 50 μm의 가는 열전대와 이를 지지하는 직경 0.3 mm의 동일 재질의 지지선 및 이 지지선을 보호하는 절연관으로 구성되어 있으며, 영점 보상은 데이터처리장치에 설치되어 있는 영점 보상 회로를 이용하여 보정하였다.

버어너 화염 전방의 고온가스 속도는 유량계에서 측정되는 유입가스량과 측정된 고온가스 온도를 이용하여 구하였으며, 이 때 고온가스의 성분은 완전반응이 일어난다고 가정하여 구하였다.

데이터 처리장치는 미국 Data Translation사의 분해능 12bit의 DT2835와 DT717T이며, 실험에서는 시간에 대한 온도곡선의 취득과 공기압 장치 및 초시계의 작동에 사용된다. 이때 공기압 장치 및 초시계의 작동은 데이터 처리 장치의 과부하 임피던스를 방지하도록 별도의 회로를 거친 후 작동하도록 하였다.

액적의 입경 및 점화시기등의 측정에 사용되는 화상처리장치는 영국 Cambridge 사의 Quantimet 520으로, 화상처리시간은 0.3 msec이며 화상기억 용량은 512×512 pixels이다.

2.3 실험 조건

실험 조건은 Table 3에서 보는 바와 같이 당량비를 일정하게 하고, 주위가스 온도 및 속도를 변화시켰으며, 이 때 스테인레스관을 버어너 출구 상단에 설치하므로써 스테인레스관의 복사열손실에 의하여 주위가스온도를 낮출 수 있었다.

2.4 실험 방법

실험은 먼저 예혼합되는 가스를 가스분배로부터 약 1 kgf/cm<sup>2</sup>의 게이지 압력으로 유출 하고, 실험 조건에 따라 유량계에 부착된 니들밸브를 조절하여 유량을 맞춘 후 평면화염 버어너를 점화시킨다. 이 때 버어너 상단의 고온가스 분위기 온도는 반경 방

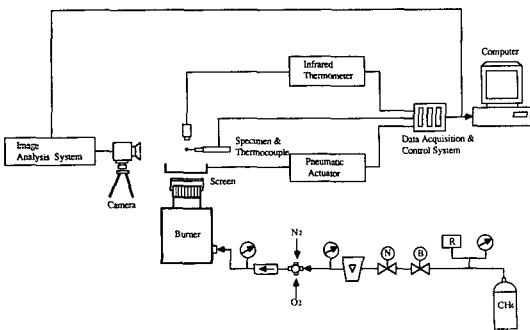


Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

Table 3 Summary of experimental conditions

Title	φ	Tg[C]	Vg[m/s]	Remark
C1	0.5	1320	0.58	
D1	0.5	1438	1.12	
S1	0.5	977	0.81	Tscreen=1007°C
S2	0.5	996	0.82	Tscreen=1007°C

향으로 균일한 온도분포를 갖게 되고, CWS 액적은 일정한 위치에서 차단막(세라믹 내화물)에 의하여 고온가스 분위기와 차단된 상태로 열전대에 매달리게 된다.

버어너 출구의 예혼합 가스가 점화된 후 화염이 안정화되면 버어너 상단에 위치한 차단막은 공기압 장치 의하여 후퇴하게 되어 액적은 고온가스 분위기에 노출되고, 실험시간을 나타내는 초시계가 작동되면서 일련의 연소과정을 VTR에 의하여 녹화·저장 하게 된다. 공기압 장치에 의하여 차단막이 후퇴하는데 걸리는 시간은 약 100 msec 정도이고, 초시계는 10 msec의 정확도를 갖는다. 따라서, 실험에서는 공기압 장치의 지연 시간을 보상하고 VTR 재생시 액적의 변화되는 시간을 정확히 측정하기 위한 실험용 프로그램을 작성하여 사용하였다.

CWS 액적이 버어너의 고온가스 분위기에 노출되면 VTR 녹화와 동시에 10 msec 간격으로 시간에 대한 온도를 데이터 처리장치에 의하여 컴퓨터에서 취득하게 되고, 실험 시작 후 20초가 경과하면 공기압 장치에 의하여 차단막을 전진시켜 화염으로부터 액적을 차단하고 초시계를 정지시킨 후 실험을 종료한다.

이와 같은 방법으로 액적의 초기 입경과 주위 분위기 조건을 변화시켜가며 실험을 실시하고, 실험이 끝난 후 VTR의 재생과 취득된 시간에 대한 온도곡선을 이용하여 결과를 분석하였다. 초기입경 및 시간변화에 따른 액적의 크기, 점화시간, 가시화염의 소멸 시간등은 VTR의 약 1/32초의 간격으로 서플이 가능한 재생신호를 화상처리장치에 입력

하여 측정하였으며, Fig. 2에서 보는 바와 같은 취득된 시간에 대한 온도 곡선으로부터는 증발시간, 점화 및 소멸시간과 이에 대한 온도를 측정할 수 있다.

### 3. 실험 결과

CWS 액적의 연소과정은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 액적의 가열, 증발, 점화, 화염의 소멸 및 차르연소등으로 구분할 수 있으며, 액적이 물의 증발 온도인 약 100°C 정도까지 가열되면 온도의 증가없이 물의 증발을 시작하게 된다. 물의 증발과정이 끝나게 되면 액적의 온도가 증가하기 시작하다가 어느 순간 급격하게 온도가 재상승하는 것을 알 수 있으며 본 연구에서는 이 곳을 점화로 정의하였다. 점화가 일어난 후 온도는 급격히 상승하다가 완만히 상승한 후 다시 급격히 상승하게 되는데, 이것은 액적이 연소할 때 휘발분과 주위 산소에 의하여 형성되는 얇은 막(화염)이 주위가스와 액적사이를 차단하다가 화염이 소멸된 후 주위가스에 액적이 노출되어 온도가 급상승하는 것으로 생각된다. 휘발분에 의한 화염이 소멸된 후에는 미분탄중의 잔유물인 차르가 연소하여 액적이 연소중에서 최고온도에 도달하게 되고 주위 가스 온도와 비슷한 온도로 다시 감소한 후 ash-shell을 남기며 액적의 연소 과정은 끝나게 된다. VTR로 녹화된 액적의 연소 과정의 재생에서는 액적의 초기 액적지름, 점화시기 및 가시화염의 소멸시간 등을 측정하였는데, 액적이 점화 하기전까지는 액적지름의 변화는 거의 없었으며, 이 경우 점화 시기는 액적 하부에서의 가시화염의 개시점으로 정의하였으며 액적 하부에서 가시화염이 발견된 후 액적의 크기에 따라 약 100~500 msec 후에 전체 액적으로 화염이 전파됨을 알 수 있었다. 이 때 액적하부에서 점화가 먼저 발생하는 이유는 액적 하부에 유동의 정체점이 생겨 이곳으로의 열전달이 활발하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 3은 VTR 재생과정에서의 가시 화염 발생 시점과 시간에 대한 온도곡선으로부터 온도가 급격히 상승할 때의 시간을 나타내고, Fig. 4는 VTR 재생으로부터의 가시화염 소멸시점과 온도곡선에의 두번째 온도상승 지점으로부터 얻은 화염소멸시간을 비교한것으로 그림에서 보는 바와 같이 두 경우가 잘 일치하므로 기준으로는 어느 경우를 선택하

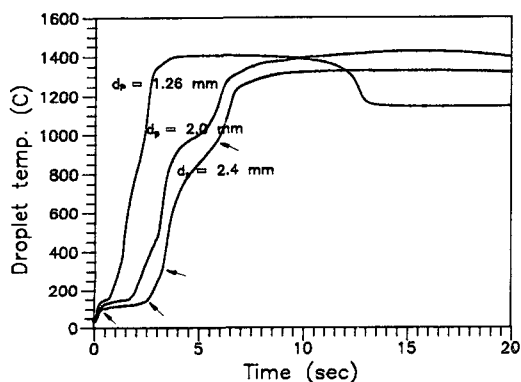


Fig. 2 Droplet temperature versus time curves

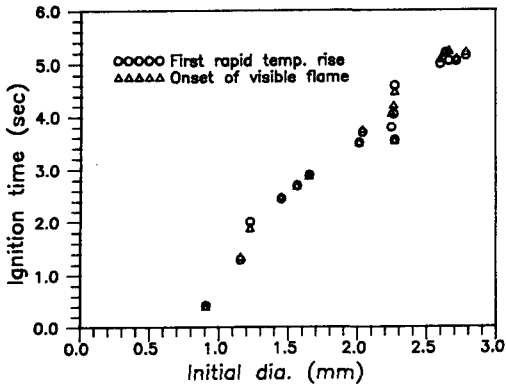


Fig. 3 Comparison of ignition times with visible flame and rapid temperature rise (CI-condition)

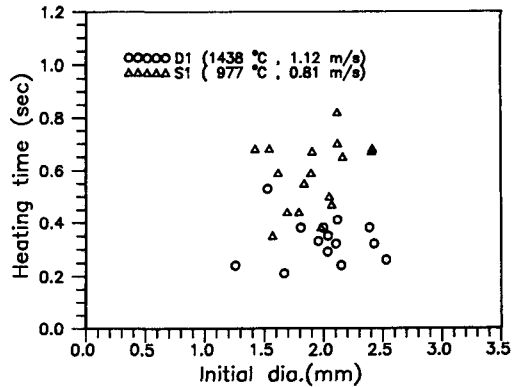


Fig. 5 Heating times versus initial droplet diameter for different ambient conditions

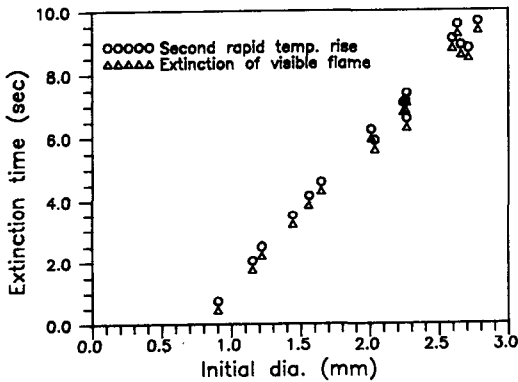


Fig. 4 Comparison of flame extinction times with visible flame and rapid temperature rise (CI-condition)

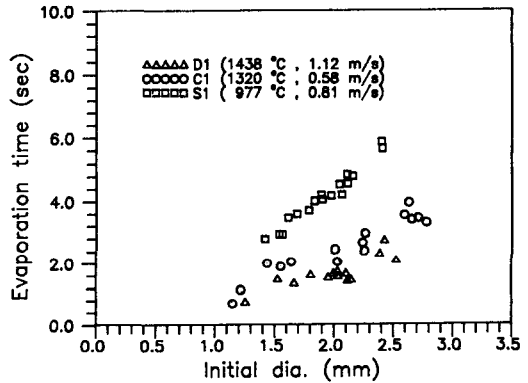


Fig. 6 Evaporation times versus initial droplet diameter for different ambient conditions

여도 무방함을 알 수 있다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 액적의 가열 및 증발 시간을 나타낸 것으로, 초기 액적지름이 클수록 가열 및 증발 시간이 길어짐을 알 수 있으며, 주위가 스운도가 높을 경우 즉, 액적이 받는 열전달량이 많을수록 가열 및 증발 시간이 짧아짐을 알 수 있다.

그러나, Fig. 5에서 나타나는 바와 같이 가열시간의 경우는 비교적 흩어짐이 많은데 그 이유는 초기 실험과정에서 공기압 장치에 의한 차단막의 후퇴에 따른 유동의 불안정 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7에는 버어너 상단에 스테인레스망을 설치한 경우, 액적의 위치를 스테인레스망으로부터 각각 10 mm(S1), 20 mm(S2)로 하여 측정된 증발시

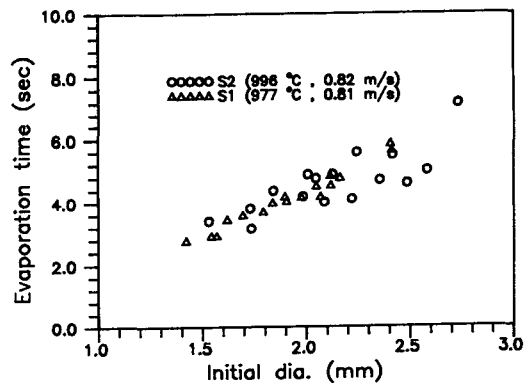


Fig. 7 Evaporation times versus initial droplet diameter for S1 and S2 conditions

간을 나타내었는데, 그림에서 보는 바와 같이 액적의 상대적 위치 변화에 의한 복사 형상계수 변화 효과는 증발시간에 별다른 효과가 나타나지 않고

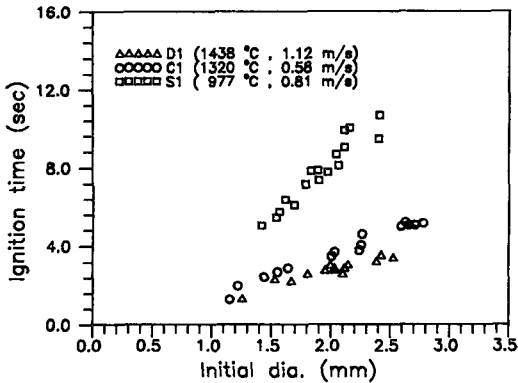


Fig. 8 Ignition times versus initial droplet diameter for different ambient conditions

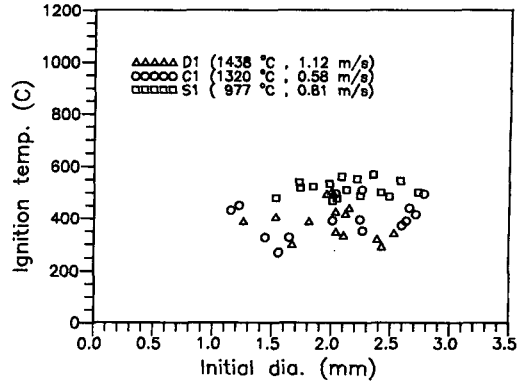


Fig. 10 Ignition temperature versus initial droplet diameter for different ambient conditions

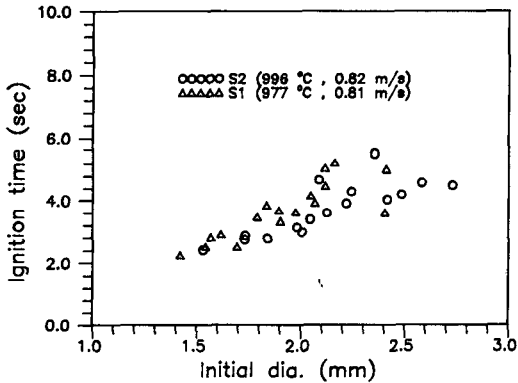


Fig. 9 Ignition times versus initial droplet diameter for S1 and S2 conditions

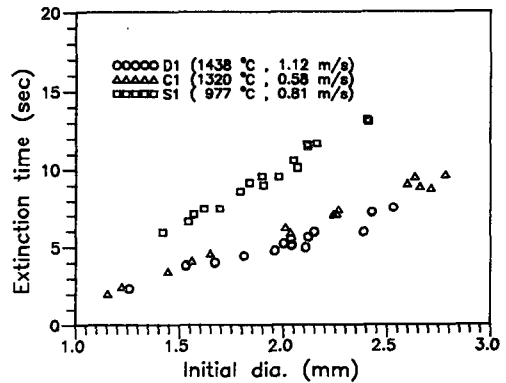


Fig. 11 Extinction times versus initial droplet diameter for different ambient conditions

있다. 또한, 두 지점의 온도차이에 의한 영향도 있으므로 이에 대하여는 추후 더욱 포괄적인 복사열에 의한 영향에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

Fig. 8는 액적이 고온가스 분위기에 노출된 후부터 점화까지의 시간을 나타낸 것으로 이 경우에도 주위 가스 온도가 높거나 초기 액적 지름이 작을 경우 점화시간이 짧게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에는 스테인레스망을 설치한 경우의 점화 시간을 나타내었는데 이 경우에도 스테인레스망과 액적사이의 거리에 따른 형상계수에 의한 복사 열 전달량의 차이에 의한 점화 지연시간에 대한 효과가 구체적으로 나타나지 않고 있어 증발 과정의 경우와 마찬가지로 복사 열전달량에 대한 보다 정량적인 실험결과가 요구된다.

Fig. 10에는 액적의 점화온도를 나타내었는데, 주위 가스온도가 높을수록 점화온도는 낮아지는 경

향이 있다. 이것은 주위 가스온도가 높을 경우 액적에서의 휘발분의 방출속도가 상대적으로 크게 되어 낮은 온도에서 점화가 발생하는 것으로 생각된다.

Fig. 11는 가시화염의 소멸시간을 나타낸 것으로 이 경우에도 주위 가스온도가 높거나 초기 액적지름이 작을수록 소멸시간이 짧아짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

CWS 액적을 대상으로 액적의 초기지름 및 주위 분위기조건 등에 따른 액적의 가열, 증발 및 점화 등의 연소과정을 실험적으로 고찰하였으며, 이러한 결과를 토대로 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액적연소에 영향을 미치는 인자로는 초기 액적지름 및 주위 분위기 조건등을 들 수 있다.

(2) 액적의 가열, 증발 및 점화시간을 줄이기 위하여는 초기 액적지름을 작게하거나 주위 가스 분위기 온도를 높이는 방법을 생각할 수 있으며 이는 버어너에서 분무되는 연료의 미립화와 밀접한 관계가 있다.

(3) 액적의 점화온도는 주위 가스분위기 온도가 높을수록 낮은 경향이 있는데, 이것은 주위 가스 분위기 온도가 높은 경우 액적 내부의 휘발 성분의 방출 속도가 크게 되는데 기인한다.

(4) 버어너 상단에 스테인레스망을 설치한 경우, 액적과 스테인레스망 사이의 거리 변화에 의한 복사형상계수 변화 효과는 구체적으로 나타나지 않았으나, 실제 연소실험에서 중요시 인식되고 있는 복사열전달에 의한 영향을 고려하여 볼 때 이에 대한 영향을 명확히 평가하기 위한 구체적인 정량적인 연구가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 1991년도 과학기술처의 일반 출연연구사업(UCE488-1562·D) 및 한국과학재단의 목적기초(KOSEF 89-02-03-08)의 연구결과이며, 이에 심심한 사의를 표함.

## 참고문헌

- (1) Godsave, G.A.W., 1953, Studies of the Combustion of Drops in a Fuel Spray: The Burning of Single Drops of Fuel, Fourth Symposium (International) on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore, pp. 810~830.
- (2) Spalding, D.B., 1953, The combustion of liquid Fuels, Fourth Symposium (International) on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore, pp. 847~864.
- (3) Goldsmith, M. and Penner, S.S., 1954, On the Burning of Single Drops Fuel in an Oxidizing Atmosphere, Jet Propul., 24. 245~251.
- (4) Wise, H., Lorell, J. and Wood, B.J., 1955, The Effects of Chemical and Physical Parameters on the Burning Rate of a liquid Droplet, Fifth Symposium (International) on Combustion, Reinhold, N.Y., pp. 132~141.
- (5) Essenhigh, 1961, R.H.J. Inst. Fuel 34, 16
- (6) Mulcahy, 1978, M.F.R. Oxygen in Metal and Gaseous Fuel Industries, p. 175. The Chemical Society, London
- (7) Field, M.A., Gill, D.W., Morgan, B.B. and Hawksley, P.G.W., 1967, Combustion of Pulverized Coal, The British Coal Utilization Research Association, Leatherhead, (a) p. 216, (b) p. 301, (c) p. 189, (d) p. 305, (e) p. 201
- (8) Smoor, L.D. and Pratt, D.T. (Eds), 1979, Pulverized-coal Combustion and Gasification, Pleum press, New York
- (9) Kobayashi, H., Howard, J.B. and Sarofim, A. F. 1977, Coal Devolatilization at High Temperature, Sixteenth Symposium on Combustion, pp. 411~425.
- (10) Ubhayakar, S.K. Stickler, D.B., 1977, C.W. Rosenberg and R.E. Gannor, Rapid Devolatilization of Pulverized Coal in hot Combustion Gases, Sixteenth Symposium on Combustion, pp. 427~436.
- (11) Norihiko Iki, Tetsuro Hirai and Nobuki nagai, 1989, Combustion Processes of a Suspended Single Droplet of Coal Water Mixture, JSME 제55권 517호
- (12) Shi-Chune Yao and Lian Liu, 1986, Behavior of Suspended Coal-Water Slurry Droplets in a Combustion Environment, Combustion and G.M. Faeth, Ignition and Combustion of Boron slurry Agglomerates, Combust, Sci. and Tech. Vol. 45, pp. 147~166.
- (13) Holl, J.T. Turns S.R., Solomon, A.S.P. and Faeth, G.M. 1986, Ignition and Combustion of Boron Slurry Agglomerates, Combust. Sci. and Tech. Vol. 45, pp. 147~166.
- (14) Yuuki, A. and Matsui, Y. 1989, A Study of Flat Flames in Porous Plug Burners; Structure Stand off Distance, and Oscillation, Combustion and Flame 69; pp. 37~48.
- (15) 안국영, 김관태, 액적의 점화 및 연소에 관한 연구, 1990, 한국기계연구원, 연구보고서