〈論 文〉

석탄-물 혼합물 단일액적의 연소 특성에 관한 실험적 연구

채재우* · 조용철* · 전영남** · 한영수**

(1992년 5월 1일 접수)

An Experimental Study on the Combustion Behavior of Single Coal-Water Slurry Droplet

Jae Ou Chae, Young Chul Cho, Young Nam Chun and Young Soo Han

Key Words: Coal-Watwr Slurry(석탄-물 혼합물), Single Droplet(단일액적), Combustion Chariacteristics(연소특성), Micro-Explosion(미세폭발)

Abstract

Coal-water slurry is considered to have the potential for displacing petroleum used in the existing oil-fired industrial and utility boilers. The combustion of coal-water slurry(CWS) is a complex process and little is known about the detailed mechanism. In this paper the combustion behavior of a single suspended droplet of CWS in hot gas stream was investigated. The effect of coal particle size, water content in droplet, initial droplet size, ambient temperature and oxygen fraction in ambient gas were studied. The results are as follows; (1) Increasing the oxygen fraction in ambient gas considerably reduced the char combustion time. (2) The variation of water content and coal particle size in droplet showed little effect on the combustion behavior. (3) In the relatively high temperature ambient gas, the water evaporation time became shorter and the combustion process was stable.

기 호 설 명

Di	: 초기 액적직경 [mm]
T_a	: 연소분위기 온도 [℃]
F(ox')	: 연소분위기중의 산소농도 [%]

1. 서 론

1970년대 오일쇼크이후 에너지의 안정적 공급 차원에서 석유 대체에너지에 대한 대체에너지 연구개발의 필요성을 대두되고 있다. 석유 대체에너지로서 가장 활용 가능성이 높은 연료는 석탄으로서 전세계적으로 매장량이 풍부하며 분포도 다양하다. 그런데 석탄은 분진공해 및 취급의 곤란 때문에 석탄자원의 효율적인 활용방안으로 석탄-기름 혼합물(coal-oil mixture=COM)과 석탄-물 혼합물(coal-water slurry=CWS) 등의 개발이 진행되어 왔다. CWS는 고점도의 비 Newton 유체이지만 액체연료로서 취급하기 때문에 연소방식으로서는 버너에 의한 분무 연소방식을 취하는 것이 가능하며 석탄에 비하여 취급이 용이하다. 그러므로 COM이나 CWS는 B-C유를 사용하고 있는 기존 B-C유 보일러의 연료분사 계통만 수정하면 사용할 수 있는 장점이 있다. 특히 CWS는 완전 탈 유류연료로서 COM보다 경제적인 우위성을 지니고 있어 널리 연구가 진행되고 있다. 또한 B-C유 보다 점도가 낮기 때문에 Pipe Line을 통한 운송이 가능하여 운송비를 절감할수 있고 석탄처럼 비산되지 않기때문에 환경오염을 줄일수 있으며 임의의 유동성과 연소성

*정회원, 인하대학교 기계공학과
**정회원, 인하대학교 기계공학과 대학원

을 얻기위하여 Slurry의 조성을 조절할 수 있다.

고체와 액체의 혼합물로 된 CWS 연료는 고점도 연료이나 B-C유와는 달리 온도에 따른 점성효과가 크지 못하기 때문에 연료를 무화상태로 만들기 위해서는 이류체 분사방식(twin-fluid atomization type)을 주로 이용하고 있다. 따라서 CWS의 무화특성을 규명하기 위한 연구들이 상당히 수행되어 왔다.[1,2,3,4,5] 한편 CWS 연소의 성공적인 시운전이 Pilot Scale에서 수행되었다.[6] 그런데 CWS의 연소현상의 규명은 CWS 액적의 연소현상 자체를 규명하는데 있음에도 불구하고 이에 대한 연구가 소홀히 취급되어 왔다.

Beer[7] 등은 CWS 액적 연소과정을 CWS 액적의 건조과정, Agglomeration형성과 팽창과정, 휘발분의 착화과정, 휘발성분에 의한 화염형성과정, 화염소화와 Char 착화과정 및 Char 소화와 Char 조각으로의 분열과정의 여섯 과정으로 분석하였다.

土本[8] 등은 액적직경이 예열 기간 중 거의 변화되지 않고 착화 후 내부에서의 휘발분의 불어나옴과 더불어 급격히 팽창하지만 화염이 사라지면 급격히 수축하고 이어 초기 액적직경 부근부터 직선적으로 감소하며 질량변화는 액적을 고온 분위기에 삽입 후 수분증발에 인해 급격히 감소하고 착화직전에는 점차로 완만한 변화를 이루며 착화까지에는 약 30%의 질량감소가 있고 착화 후는 잔존 질량이 약 40% 위치하며 char 연소기간 동안은 직선적으로 감소하고 질량 감소율은 일정하게 된다고 보고한 바 있다.

平井[9] 등은 연소중인 액적단면을 전자현미경으로 관찰한 결과 휘발분의 연소중에는 표면 부근에 작은 공극과 균열이 많이 있지만 중심부근에는 아직 공극이 없이 미소한 석탄의 응집체가 간혹 관찰됐으며 한편 Char 성분의 연소중에 액적단면에서는 전체적으로 다공질로서 표면부근보다도 중심부분의 공극이 크게 이루어져 있는것을 볼수 있었으며 이와같이 표면부근과 중심부근의 조직이 다른것은 표면과 중심부의 온도차에 의해 생기는 것으로 생각된다고 하였다.

Yao[10] 등은 시료로서 역청탄(bituminous coal)과 갈탄(lignite coal)을 사용하여 탄종에 따른 CWS 액적의 연소특성을 비교 연구하였다. 역청단은 Caking Coal이고 갈탄은 Noncaking Coal이기 때문에 매우 다른 연소형태를 나타내며 특히 역청탄은 가열기간 동안 Popcorn처럼 팽창(swelling)하지만 갈탄은 전혀 팽창이나 폭발이 일어나지 않고 전 과정을 지나는 동안 액적의 크기가 점차 줄어들며 Char성분의 연소시간도 역청탄 보다 짧은 것을 관찰했다.

CWS 액적내의 물의 존재는 연료의 착화, 화염의 안정성(flame stability) 및 연소효율에 상당한 영향을 미칠 것이다. 그러나 함유수분에 의한 미세폭발(micro-explosion) 등의 CWS 연료 특유의 연소촉진현상이 추측되어 연소성은 그다지 나쁘게 되지 않는다고 생각되는 경향도 있고, CWS 연소기구의 해명은 아직 충분히 되어있지 않다. 따라서 CWS 연소의 근본인 단일 CWS 액적의 가열 및 연소현상을 규명하는 것이 선결되어야 한다.

CWS 액적중의 수분이 증발한 후 석탄입자들인 Agglomeration의 물성치(밀도, 기공도, 열전도 등)는 석탄입도에 의해 영향을 받을 것으로 기대된다. 한편, 연소란 연료와 산소의 화학적 결합이므로 고온가스중에 노출되는 CWS 액적의 연소는 고온가스중의 산소농도에 의해 좌우될것으로 생각된다.

그러므로 본 연구에서는 CWS 액적의 가열 및 연소에 관한 현상규명에 있어서 액적크기, CWS 석탄함량 및 연소분위기 가스온도, CWS 액적중의 미분된 석탄입자의 크기와 특히 분위기중의 산소농도의 변화에 의한 영향을 파악하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 버너, 연소로, 미세 열전대, 액적 중심온도 측정장치와 순간 사진촬영 장치로 구성되어 있다.

버너는 균일한 온도분포를 갖는 고온가스 유동을 형성하기 위하여 Honeycomb Ceramic Substrate (400 cell per square inch, 재질 : Cordierite, 美 CONNING Co.)를 이용하여 평면화염(flat flame)을 형성하는 연소기를 제작한다.

연소로는 내화 캐스터블(HACT 160, 조선내화(주))로 제작하며 고온 연소가스의 외부로의 열손실을 가능한 한 적게하기 위하여 50 mm의 세라믹 섬유(ceramic fiber, 금강안면(주))로 단열시켰으며 미세온도 조절은 산화마그네슘에 칸탈열선을 묻혀 제작한 매몰식 전기 Heater(용량 : 3 kw, 사용범위 : 0~1200℃, controller : SCR unit)를 연소로 상부에 장착하였다.

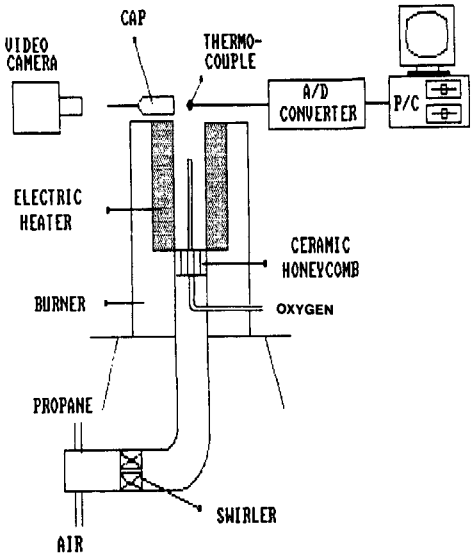

Fig. 1 Schematic of the setup

미세 열전대는 두가지 기능을 갖는바 첫째 고온 배기가스 유동중에 CWS 액적을 유지시키고, 둘째 액적중심에서의 온도변화를 측정하는데 그 목적이 있다. Pt-Pt 10% Rh 열전대를 사용하였으며 백금 성분의 산화촉매작용으로 인한 온도 측정상의 오차의 발생을 방지하기 위하여 교반기(agitator)를 사용해서 Sodium Silicate Solution을 Coating하여 사용하고 열전대는 자기재의 전열관과 3.0 mm의 스테인레스 스틸관에 의해 지지된다. 또한 온접점에서의 복사나 소선으로부터의 열전도에 의한 오차도 고려할 필요가 있지만 본 실험에 사용될 열전대선이 0.05 mm로 충분히 가늘기 때문에 그 영향은 미미할것으로 생각되어 특별한 보정은 하지 않았다.

CWS 액적의 온도측정은 A/D 변환기와 P/C를 사용하였고 순간사진 촬영은 비디오 카메라를 사용하영 CWS 액적의 연소진행과정을 촬영한다.

2.2 실험방법

프로판과 공기는 각각은 오리피스 유량계(flow-cell, japan)를 통해 유량이 측정되어 조절밸브를 거쳐 혼합실(mixing chamber)로 유입된다. 유입된 연소용 혼합기는 혼합실에서 충분히 혼합되어 연소기로 유입되어 고온가스로 연소되어 연소실을 일정온도(700℃), 유속(5 m/s)으로 흐르며 연소분위기를 형성한다.

연소실의 온도제어를 위해 연소실 벽면에 장착된 전기히터로 700℃에서 1200℃ 사이에서 조절하였으며 연소분위기의 산소농도를 조절하기 위해 소량의 산소를 첨가하여 연소분위기를 조절하였다.

액적이 고온가스 유동에 순간적으로 노출되어 연소될수 있도록 하기위해 ceramic cap을 가열전에는 CWS 액적에 씌워져 있다가 스프링장치에 의해 순간적으로 벗겨지도록 하였다.

CWS 액적의 온도측정은 열전대로부터의 전기적 신호를 A/D 변환기를 거쳐 그 온도값을 P/C에 기록하도록 되어있다.

또한 비디오 카메라를 이용하여 착화전후의 CWS 액적의 연소과정을 관찰하고자 매 실험마다 미세열전대, 액적의 초기 크기와 가열하는 동안 액적크기변화와 착화 순간 사진을 촬영하였다.

2.3 액적 제조

(1) 석탄 입자의 조성

본 연구에 사용될 CWS 연료는 현재 국내에서 수입되는 대부분의 석탄과 CWS 연료에 사용되는

Table 1 Properties of coal

Proximate analysis (wt%)	Moisture	1.46
	Ash	14.06
	Volatile Moisture	26.00
	Fixed Carbon	58.78
Ultimate Analysis (wt%)	Carbon	71.31
	Hydrogen	3.89
	Nitrogen	1.30
	Sulfur	0.67
	Oxygen	8.71
	Ash	14.12
	Total	100.00
Higher Calolic Value	6,845 Kcal/kg	

Table 2 Composition of CWS

Sample No	Coal (wt%)	Water (wt%)	Coal Particle size (μm)
1	65	35	*100mesh pass (%) wt fraction : 0.22
2	60	40	
3	57	43	*200mesh pass (%) wt fraction : 0.88
4	50	50	d=57μm

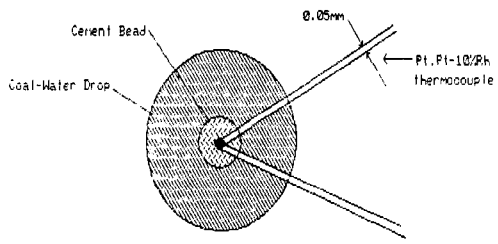

Fig. 2 Close view of micro-thermocouple

석탄이 유연탄임을 감안하여 호주산 역청탄을 사용하여 제조하였으며 호주산 역청탄의 성분 분석표는 Table 1과 같다.

(2) CWS 액적의 조성

본 실험에 사용될 CWS 연료는 먼저 lump coal을 자체 제작한 분쇄기(crusher)로 분쇄하고 sieve shaker와 표준망채(standard Sieve)를 이용하여 20~140 μm의 입도를 갖는 미분탄을 얻고 여기에 각각 다른양의 증류수를 첨가하여 4가지 sample CWS 연료를 제작하였다.

Table 2에 sample CWS 연료의 조성이 나와있다.

(3) CWS액적의 제조 및 부착

본 실험에 필요한 CWS를 소량 다품종으로 직접 제조해야 하므로 소형 석탄 분쇄기를 설치하여 미분탄 석탄입도를 표준망채로 분석한다. 미분된 석탄의 평균입도는 통상 제조되고 있는 CWS의 문헌분석에 따라 20 μm~100 μm 범위내에서 선정한다. 사용석탄은 수입되는 대부분의 석탄과 CWS에 사용되는 석탄이 유연탄임을 감안하여 유연탄으로 국한한다. 분쇄된 미분탄은 첨가제(additive) 없이 직접 물과 혼합하여 실험용 CWS를 제조한다.

CWS는 대량생산의 경우에는 첨가제를 넣어 CWS의 분리를 방지하여야 하나 본 실험에서는 소량제조이므로 첨가제가 불필요하다. 단, 매 실험전에 제조된 CWS는 균질성을 유지하기 위하여 철저히 섞어준 후에 사용하여야 한다.

Fig. 2는 CWS 액적이 열전대에 부착되어 있는 상세 단면도이다.

CWS 액적을 부착하고 그 온도상승을 측정하는데 사용되는 미세 열전대는 pt/pt-10% Rh 열전대이다. 일반적으로 열전대는 50 μm의 직경을 갖으며 용융열전대 bead의 직경은 90 μm이하로 만들수 있다.

용융 bead은 열적 감응도가 높은 시멘트(saureisen No.8)의 얇은 막으로 코팅한다. 이때 시멘트 bead의 직경은 대략 200~300 μm가 되도록 한다. 세멘트 코팅은 CWS 액적과 부착성을 증대시켜서 액적을 쉽게 부착시킬수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소 분위기 온도의 변화에 의한 영향

Fig. 3은 CWS 액적의 전형적인 연소시의 온도변화를 나타낸 것으로서 (a)는 액적이 고온분위기에 노출된 직후 액적내의 수분이 비등점(boiling point)까지 가열되어 액적표면을 통하여 방출되는 과정이며 (b)는 수분이 모두 증발된 후 액적내의 휘발분(volatile material)이 생성되는 구간이며 이때 액적온도의 증가는 급격해 진다. (c)는 생성된 휘발분이 착화되어 화염이 액적주위를 둘러싸며 연소하는 구간이다. (d)는 휘발분이 모두 연소되어 액적을 둘러싼 화염이 사라지고 Char 성분이 연소되는 구간이다. 화염이 사라진 잠시후 액적이 최고온도에 도달 하는 것을 볼수 있으며 char 성분의 연소가 완료되면 액적의 온도가 급격히 떨어지게 되고 액적의 총 연소 시간중 char 성분의 연소시간이 상당히 긴것을 볼수있다. (e)는 연소가 모두 완료되어 재(ash)만 남아 분위기 온도에 가까워지게 되는 구간이다.

Fig. 4, 5는 석탄함량 60 wt%, 액적 초기 직경 1 mm인 CWS 액적을 각각 분위기 온도 830℃,

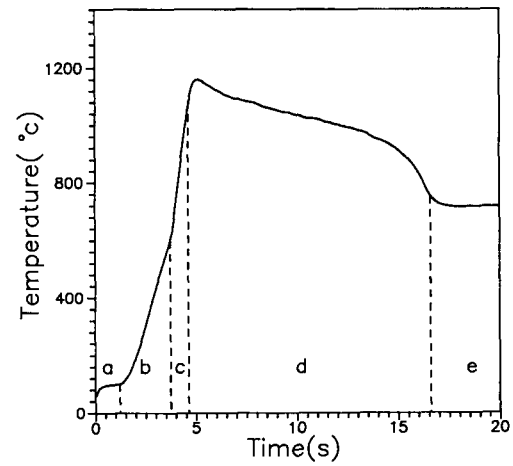

Fig. 3 Typical temperature history of CWS droplet center

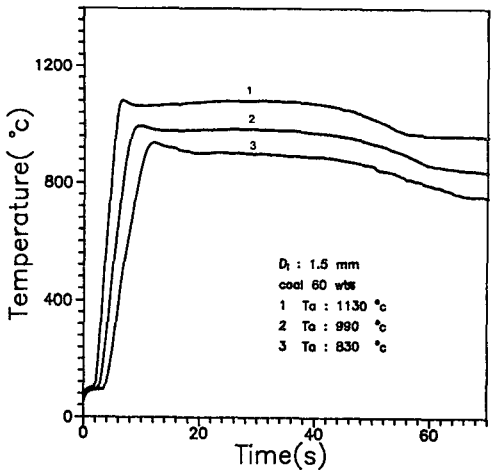

Fig. 4 The influence of ambient temperature on the temperature history of CWS droplet center

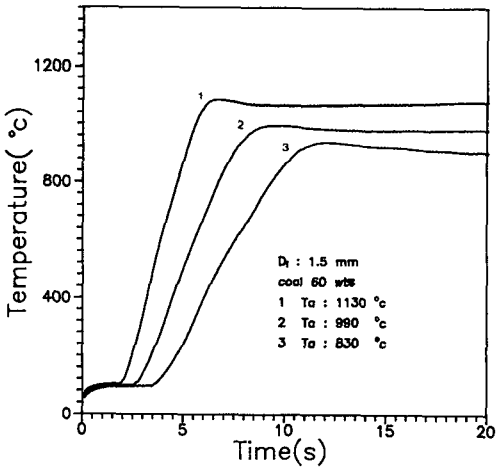

Fig. 5 The influence of ambient temperature on the temperature history of CWs droplet center

990℃, 1130℃에서 연소시켰을 때의 CWS 액적의 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. CWS 액적은 고온의 분위기에 순간적으로 노출된 직후 수분의 비등점까지 가열된 후 이를 방출하는 거동을 보인다.

그림에서 볼 수 있듯이 분위기가 고온일 경우 액적 내부로의 강한 열전달에 의해 수분 증발시간(water evaporation)이 짧아짐을 볼 수 있다. CWS 액적은 수분의 증발 후에 액적 내부의 휘발분생성으로 인한 압력 상승으로 휘발분을 방출하며 액적은 휘발분 방출중에 착화된다. 또한 분위기 온도가 높을 수록 휘발분의 방출이 왕성하여 휘발분의 단위 시간당 연소량이 증가하고 순간적으로 강한 열을 받아 CWS 액적 내부에 존재하는 휘발분의 팽창에 의한 액적 내부 압력의 증대로 인해 개개의 석탄 입자 상태로 분산되어서 연소 촉진으로 인한 온도 상승이 급격히 이루어지는 것으로 생각된다. 그러므로 착화지연 시간(ignition delay time)이 짧아지고 또한 분위기 온도가 높을수록 액적과의 온도 구배가 적어져 액적이 연소중 외부로 방출되는 열이 감소하여 일종의 단열효과가 증대되기 때문에 액적이 최고 온도 또한 높아짐을 볼 수 있다.

분위기 온도가 낮으며 석탄 입자들이 느린 속도로 가열되어 이로인한 수분증발 시간의 증가와 석탄의 입자들 간에 응집이 일어나는 하나의 입자 상태로 연소되어 연소시간이 길어지는 것으로 생각된다.

한편 고온 분위기에서 연소되는 CWS 액적에서는 석탄의 낮은 열전도율 때문에 액적 외부로부터의 큰 전도 열유속에 의해 급격히 온도가 상승하는 표면 부근과 중심 부근과의 온도차가 발생하게 되고 표면과 중심간에 석탄 입자가 휘발분 가스의 발생, 방출 및 그 후의 고체화 하는 시간에 차이가 생긴다. 온도차가 클 때는 액적표면이 휘발분을 방출한 후 작은 공극이 있는 딱딱한 Shell이 형성되는데 중심 부근에서는 그때까지도 휘발 가스를 생성, 방출하게 되며 Shell은 휘발분 가스 방출에 저항이 되기 때문에 액적 내부의 압력이 높아져 Shell의 일부분이 깨지는 파열현상이 발생할 수 있다.

3.2 초기액적직경의 변화에 의한 영향

CWS 연료는 고체와 액체의 혼합물로서 B-C유와는 달리 온도에 따른 점성효과가 크지 못하기 때문에 연료를 무화 상태로 만들기 위해서는 2유체 분사방식(twin-fluid atomization)으로 분무되어 연소한다. 그러므로 분사 노즐의 형상, 미립화용 공기와 CWS 연료와의 질량 유량비 등의 분무 조건에 따라 액적의 분무 입경을 조절하여 연소시키는 것이 가능하며 액적의 초기 입경은 CWS 액적의 연소에 상당히 중요한 변수가 된다.

Fig. 6, 7은 연소분위기 온도 990℃에서 석탄함량 60 wt%의 CWS 액적의 초기 입경을 서로 다르게 하여 연소시켰을때 시간에 따른 액적중심의 온도 변화를 나타낸 것이다. 액적의 초기 입경이 클

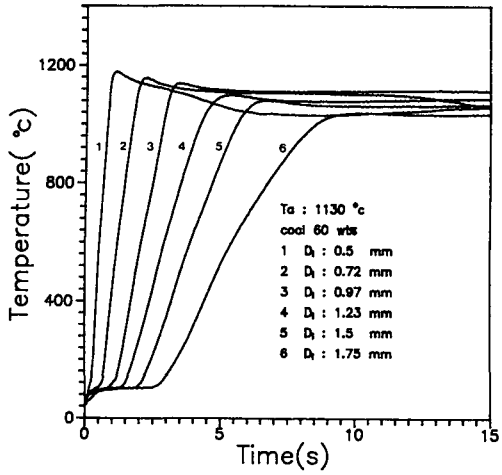

Fig. 6 The influence of the initial droplet size on the temperature history of CWS droplet center

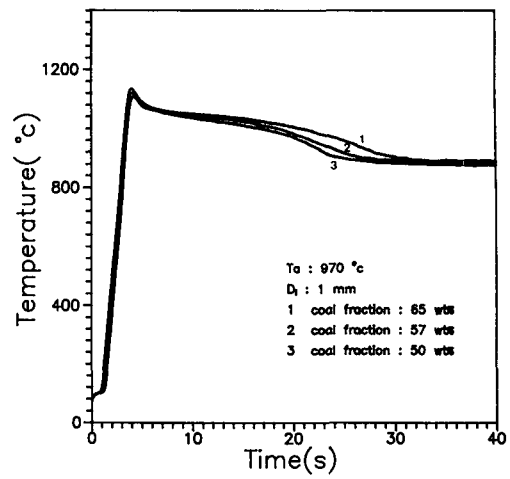

Fig. 8 The influence of coal fraction on the tempera ture history of CWS droplet center

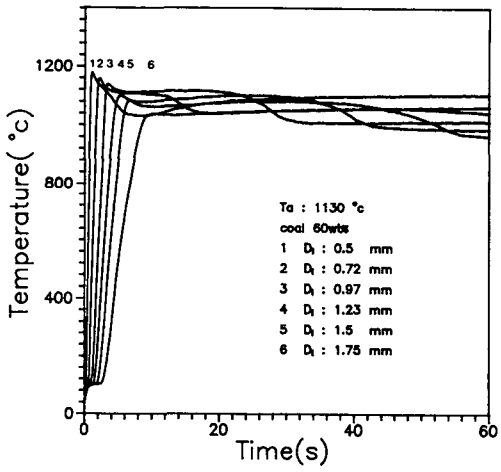

Fig. 7 The influence of the initial droplet size on the temperature history of CWS droplet center

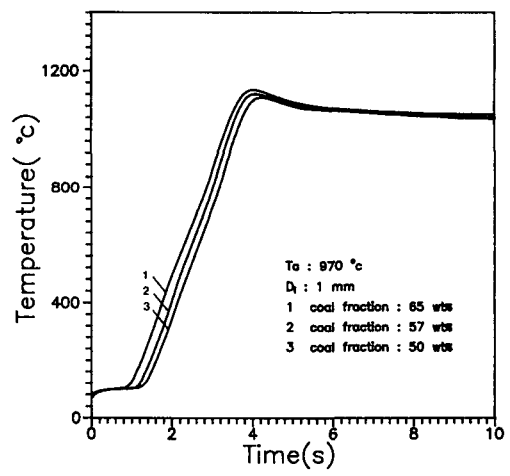

Fig. 9 The influence of coal fraction on the tempera- ture history of CWS droplet center

수록 함유하고 있는 수분의 양도 증가하게 되어 수분증발시간(water vaporation time)이 길어지고 또한 수분증발이 끝난 직후 부터 액적중심 최고 온도의 90%까지 가열되는 데 걸리는 시간으로 정의되는 가열기간(heat-up duration)이 현저하게 증가함을 알 수 있는 데 이는 액적직경이 클수록 상대적으로 액적내부로의 열전달이 늦어져 이로 인하여 액적내부의 휘발분의 생성이 지연되므로 착화지연시간이 길어지고 착화 후 액적내부에서 생성된 휘발분의 연소로 인한 급격한 팽창이 야기되어 내부압력이 일정치 이상으로 커질때 액적 파열의 현상이 일어날수 있다. 또한 액적의 크기가 커질수록 함유하는 Char 성분의 양도 상대적으로 많아지므로 Char의 연소시간도 따라서 증가하게 된다.

3.3 액적내의 수분함량 변화에 의한 영향

CWS 연료는 미분된 석탄 입자에 물을 일정 비율로 혼합하여 제조한 것으로 운반의 용이성, 기존의 액체 연료 연소장치에의 용이한 적용으로 매장량이 석탄에 비해 상대적으로 적은 유류 연료의 대체효과 등의 장점을 갖는다.

따라서 본 연구에서 수분함량의 변화에 따라 연소성에 미치는 영향을 연구하였는데 Fig. 8, 9는 분위기 온도 970℃에서 수분 함량이 각각 50%, 43

%, 35%인 CWS 액적을 초기 직경 1.0 mm로 현수시켜 연소시켰을 경우의 시간에 따른 액적중심의 온도 변화를 나타낸 것이다.

액적내의 물의 함량은 수분증발 시간에 중대한 영향을 미친다. Fig. 9에서 볼수있듯이 물 함량의 증가로 인해 수분증발시간이 현저히 증가하며 더불어 착화지연이 길어지고 액적중심의 최고 온도는 낮아지는 것을 볼수있다. 한편 Fig 8에서는 휘발분의 연소 이후에 이어지는 Char 성분의 연소시간은 물의 함량이 증가할수록 감소하는 것을 볼수있는데 이는 두가지 요인이 있는 것으로 생각할 수 있다. 하나는 물 함량이 높아지면 상대적으로 석탄 함량이 감소하기 때문이고 또 하나는 액적내의 수분 함량이 많은 경우 수분 증발이후에 액적내에 많은 공극이 형성되므로 비 표면적(specific area)이 증가하여 char 내부로의 산소의 확산이 다소 용이해지는 때문으로 생각할 수 있으나 전자의 요인이 지배적인 것으로 생각된다.

3.4 액적내의 석탄의 입도변화에 의한 영향

Fig. 10, 11은 액적내의 미분탄의 평균 입도가 각각 30 μm, 76 μm인 액적을 분위기 온도 970℃에

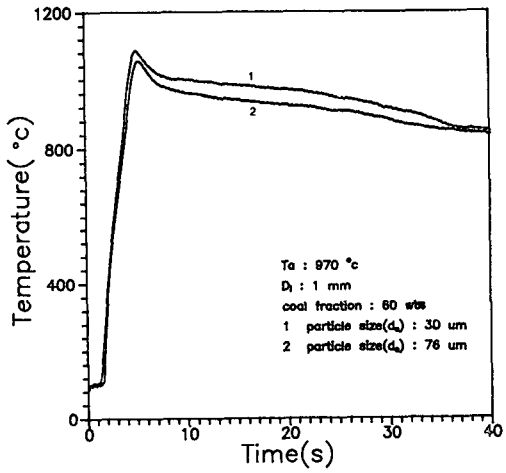

Fig. 10 The influence of coal particle size on the temperayure history of CWS droplelt center

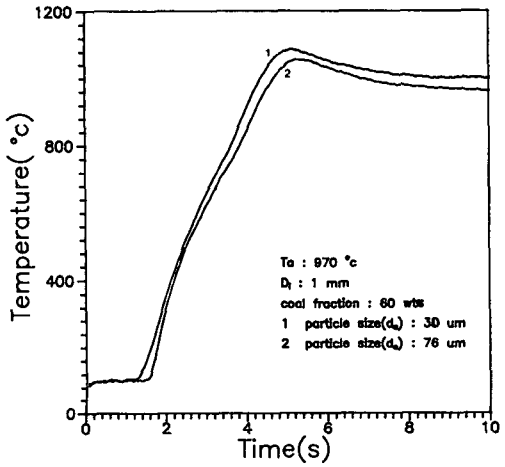

Fig. 11 The influence of coal particle size on the temperayure history of CWS droplet center

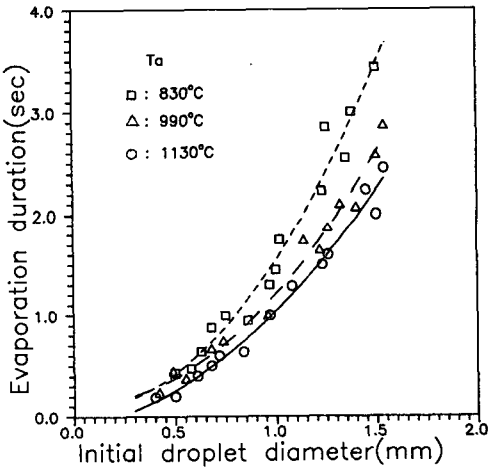

Fig. 12 Water evaporation duration of CWS droplet as a function of initial droplet size and ambient temperature

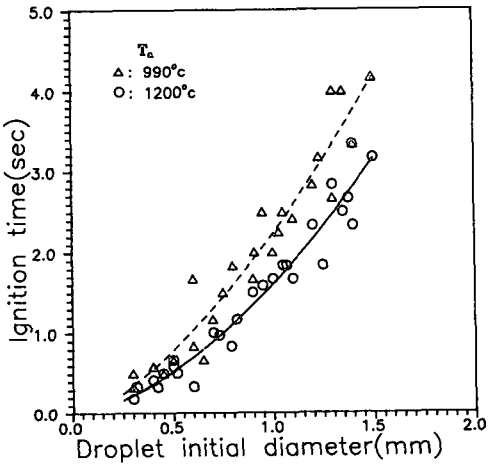

Fig. 13 Ignition delay time of CWS droplet as a function of initial droplet size and ambient temperature

서 연소시켰을 때의 액적 중심의 온도 변화를 나타낸 것이다. 미분탄의 입도가 작은 액적은 수분증발시간이 상대적으로 짧아지고 최고온도는 높아지나 그리 두드러진것은 아니다. 한편 낮은 분위기 온도에서는 미분탄의 평균 입도가 작을수록 Char의 연소시간이 짧아지는 경향을 보이지만 분위기 온도가 높을수록 그 차이는 적어진다. 이는 수분증발 후에 석탄의 입도가 작은것이 액적의 비 표면적(specific area)이 커지므로 주위의 산소와의 결합이 용이해져 Char의 연소시간이 다소 짧아지나 분위기 온도가 고온 일수록 Char의 부분적인 용융(melting)이 야기되므로 다공질 구조가 무너져 그 효과는 적어지는 것으로 생각된다.

3.5 액적직경의 변화와 분위기 온도의 변화가 수분 증발시간에 미치는 영향

수분 증발은 CWS 연료가 갖는 독특한 현상으로 수분의 비등온도인 100℃ 부근에서 발생하며 CWS 연료의 연소특성에 영향을 줄 것으로 생각된다.

Fig. 12는 60% CWS 액적을 연소분위기 온도 각각 830℃, 990℃, 1130℃에서 CWS 액적의 초기 직경을 0.3~1.5 mm까지 변화시켜 가면서 연소시켰을때 수분증발시간의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 액적초기직경이 0.3 mm인 경우 수분 증발 시간이 상당히 짧지만 액적의 초기직경이 1.5 mm까지 증가함에 따라 함유하고 있는 절대수분의 양이 많기 때문에 수분 증발 시간이 급격히 증가하며 수분 증발 시간의 증가는 대략 액적 직경의 제곱에 비례하는 경향을 볼 수 있다. 한편 동일한 액적초기직경에 대해서 분위기 온도가 높아질수록 수분증발시간이 짧아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 분위기 온도가 높을수록 액적에 전달되는 heat convection이 강해지고 또한 수분의 증발이 액적 표면부터 정상적으로 완만히 생성되는 때문이며 분위기 온도가 높을수록 액적 내부의 과열증가에 의한 압력 상승이 증대되어 수증기의 분출도 부분적으로 존재하므로 일종의 증발촉진효과가 커지는 것으로 추측할 수 있다.

3.6 액적직경의 변화가 착화지연시간과 착화온도에 미치는 영향

본 연구에서 착화지연시간은 CWS 연료를 연소분위기내로 삽입시킨 후부터 수분증발시간을 포함하여 착화가 발생하기까지의 시간으로 정의하였으며 연소에 있어서 착화시간의 단축은 연소성의 증대효과를 가져온다.

Fig. 13은 990℃, 1200℃에서 CWS 액적의 초기직경을 0.3 mm에서 1.6 mm까지 변화시켜가면서 연소시켰을 경우 착화지연시간의 변화를 나타낸 것이다.

수분증발시간의 변화와 유사한 경향을 나타내고 있으나 착화지연시간이 수분증발시간을 포함하므로 착화지연시간이 전체적으로 수분증발시간보다 큰 절대값을 갖는다. 액적초기직경이 증가함에 따라 착화시간은 대략 초기직경의 제곱에 비례하여 증가하는것을 볼 수 있으며 분위기 온도가 높을수록 착화에 이르기까지의 시간이 짧아짐을 볼 수 있다.

한편 Fig. 14은 분위기 온도 990℃에서 초기 액적직경 변화에 따른 착화시간과 착화시의 온도 분포를 나타낸 것으로서 액적의 초기직경이 증가함에 따라 액적의 착화온도는 낮아지는 것을 볼 수 있다.

3.7 Char 연소시간

Fig. 15는 분위기 온도가 각각 830℃, 990℃, 1130℃에서 액적 초기 직경을 0.4~1.6 mm로 변화시켜 연소시켰을 때의 Char 연소시간의 변화를 나타낸 것이다.

Char 연소시간을 정의하는 기준은 정확히 설정하기가 모호하나 본 연구에서는 가시 화염(visible flame)이 소멸된 직후부터 급격히 온도가 떨어져 분위기 온도에 가까워지기 직전까지를 Char 연소기간으로 정의하였다.

액적직경이 커지면 Char 연소시간도 따라서 증가하는 경향이 나타나며 그림에서 볼수 있듯이 그 정도는 초기 액적직경에 비례하는 것을 볼 수 있다. 또한 분위기 온도가 높아짐에 따라 Char 연소시간이 짧아지는 경향을 나타내기는 하나 그리 두드러진것은 아니다.

3.8 분위기중의 산소농도는 변화에 따른 CWS 액적의 연소거동

Fig. 16은 분위기온도 850℃에서 초기직경 1 mm의 액적을 연소분위기중의 산소농도를 7.4%에서 21.6%까지 변화시켜 연소시켰을 때의 액적중심의 온도변화를 나타낸것이다.

산소농도를 증가시켜도 수분증발과 휘발분생성에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 볼수있으나 착화

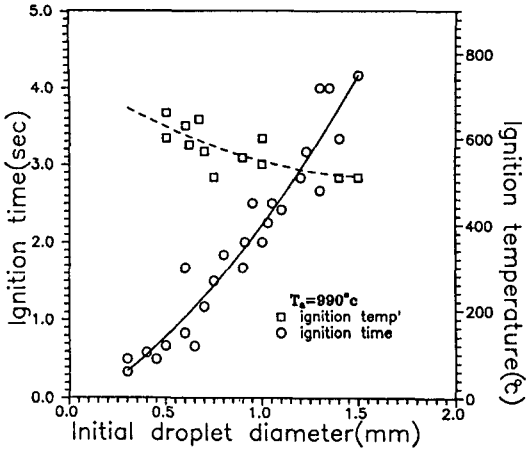

Fig. 14 Ignition time and temperature of CWS droplet as a function of initial droplet size

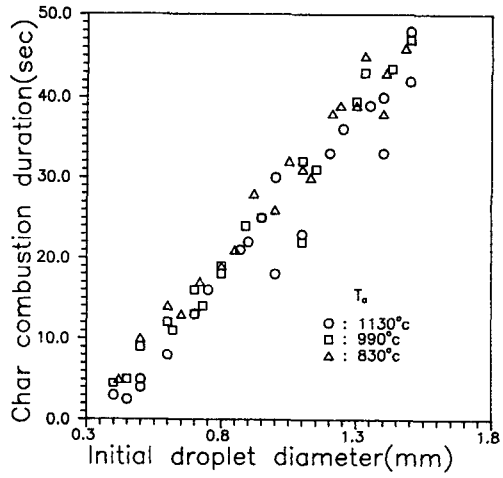

Fig. 15 Char combustion of CWS droplet as a function of initial droplet size and ambient temperature

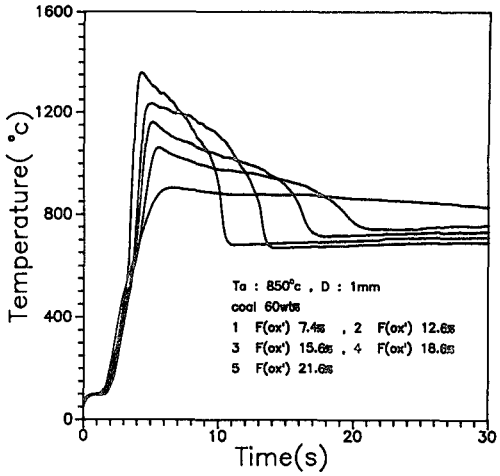

Fig. 16 The influence of oxygen fraction in ambient gas on the temperature history of CWS droplet center

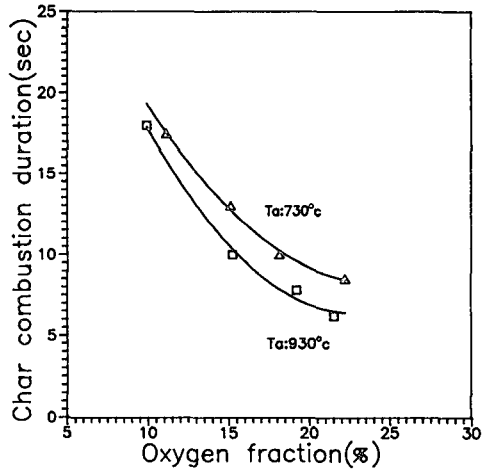

Fig. 17 Char combustion duration of CWS droplet as *a function of oxygen fraction in ambient gas*

후 액적중심의 최고온도는 분위기중의 산소농도의 증가에 따라 크게 높아지는것을 볼수있으며 이는 화염면으로 산소의 확산이 증가하기 때문으로 생각된다. 또한 산소농도의 증가에 따라 가시화염의 소멸이후 액적내의 공극으로 많은 양의 산소가 확산되어 Char 성분의 산소와의 연소반응이 더욱 활발하게 일어나며 또한 액적내부의 급격한 연소로 인하여 압력이 증대되어 이를 이기지못한 액적표면의 약한부분이 깨져 액적내부의 물질이 분출되는 미세폭발현상도 활발하게 일어나 Char성분의 연소시간은 급격히 짧아진다.

한편 Fig. 17에서 볼수있는 바와 같이 연소분위기내의 산소농도가 상대적으로 낮은 조건에서 산소농도를 증가시켰을때 Char 연소시간의 감소율이 더 커지는 것을 알수 있다.

4. 결 론

본 연구는 CWS 연료의 연소특성을 규명하기 위하여 고온의 안정된 예혼합 평면화염으로 이루어진 연소분위기내에서 액적직경, 액적내의 물 함량, 미분탄의 평균입도, 연소분위기 온도 등을 변화시켜 단일 CWS 액적을 현수법으로 연소실험으로 수행

한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연소 분위기가 고온 일수록 수분증발 시간과 착화지연 시간이 짧아지며 액적의 최고온도는 높아진다. 또한 Char 연소 시간은 감소하는 경향을 보이나 그 정도는 미미하다.

(2) 액적의 초기직경이 클수록 수분증발 시간과 착화에 이르기까지의 착화지연 시간이 길어지면 Char 연소시간 또한 길어지고 최고온도는 낮게 나타난다. Char 연소시간은 액적의 초기직경에 거의 선형적으로 비례하여 증가한다.

(3) 액적내의 물 함량이 많을수록 수분증발 시간이 길어지고 액적의 최고온도는 낮아지며 Char 연소시간은 짧아져 총 연소시간은 물 함량이 많을수록 짧아진다.

(4) 액적내의 미분탄의 평균 직경이 작을수록 수분증발 시간이 짧아지고 최고온도는 높아진다. 또한 Char 연소시간이 약간 감소하는 경향이 보이기는 하나 분위기가 고온일수록 그 효과는 거의 무시될수 있는 정도다.

참고문헌

(1) Sakai, T. etc., 1984, "Research and Development of CWM Combustion," 6th. Int. Coal Slurry Combustion and Technology, Orlando, Florida.

(2) Sakai, T. etc., 1981, "Atomization and Size Distribution of Slurry," 10th Japan Conference on Liquid Atomization and Spray System.

(3) Sakai, T. etc., 1982, "Mean Diameters and Distribution of Coal Slurry Fuel Spray," 11th Japan Conference on Liquid Atuomization and Spray System.

(4) Saito, M. 1980, "Atomization of Suspension", 9th. Japan Conference on Liquid Atomization and Spray System.

(5) Chae, J. O., Kim, Y. T., Oh S. K. and Song, J. K. 1988, "The Effect of Liquid Viscosity on Automization," the first DSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Seoul, November 1-3.

(6) Scheffee, R.S. et. al., 1982, Comb. Flame 45, p.121.

(7) Beer, J. M. et. al., 1986, "Fundamentals of Coal-Water Fuel Combustion," Eight International Symposium on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Florida, America.

(8) 土本 信孝, et. al., 1986, "CWM の 單一液適燃燒に關する研究", 第24回 日本燃燒ツソホツウム前刷集, Japan, Nov. 26-28.

(9) 平井 哲郎. et. al., 1987, "CWM 液適 の 燃燒過程," 第25回 日本燃燒ツソツホツウム前刷集, Japan, Nov 26-28.

(10) Yao, S. C. et. al., 1983, Behavior of suspended CWS Droplets in a Combustion Environment, Comb. Flame 51, p.335.