

## CWM 단일액적의 연소특성에 관한 연구

박종상\* · 이태원\*\* · 하종률\*\*\* · 정성식\*\*\*  
(1999년 6월 17일 접수)

### An Experimental Study on the Combustion Characteristics of CWM Single Droplet

Chong Sang Park, Tae Won Lee, Jong Yul HA and Sung Sik Chung

**Key Words** : CWM(Coal-Water Mixture), Micro-Explosion(미세폭발), Porosity Rate(기공률), Mass Fraction Burned(질량연소율)

#### Abstract

As the combustion process of CWM consists of the water evaporation, the release and combustion of volatile matter, and the combustion of char for every particle, it is more complex than that of existent liquid fuel. Though the many studies on CWM combustion have been carried out by the single droplet using hanging methods or the multiple droplet using atomization methods, any report don't presents definite solution about the effects by the initial water evaporation and combustion of volatile. When CWM is suddenly exposed in the high temperature surroundings, the internal water evaporates and then each droplet builds up pores. Besides, porosity rate changes along the temperature of surroundings, the composition ratio of CWM, and the initial diameter of droplet. In result, because it affects the whole combustion rate, the combustion of CWM has complex mechanism as compared with the combustion of liquid or gas fuel. Therefore, concentrating on porous structure of CWM, this study has proceeded to acquire the basic data on the CWM injection combustion and closely examines the effects of the first stage combustion on the whole combustion by measuring the diameter variations, pore rate, mass fraction burned, and the internal temperature changes of CWM droplet. The results demonstrate that 60~70% of initial mass is reduced during water evaporation and volatile combustion period, and swelling rate, mass fraction burned, and density variation are greatly concerned with atomization of CWM etc.

#### 1. 서 론

최근 석유계 연료의 매장량의 한계로 인하여 석탄 가스화(coal gasification) 및 석탄 슬러리 연소기술을 이용한 대체에너지 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

석탄 슬러리는 미분탄과 적당한 액체(중유, 물, 매탄올), 그리고 소량의 첨가제를 혼합한 것으로서

액체의 종류에 따라 CWM(coal-water mixture), COM(coal-oil mixture) 및 CMM(coal-methanol mixture) 등이 있다. 특히 이 중에서도 CWM은 석유에 의존하지 않고 단지 물과 첨가제만을 사용하기 때문에 염가이고, 슬러리 제조과정에서 어느 정도 탈회분, 탈황이 가능하며 COM에 비해 점도가 낮아 미립화가 쉽다. 따라서 CWM은 액체연료의 연소방법과 같이 분무에 의한 연소가 가능하기 때문에 종래의 석탄연소방법과는 달리 연소기의 소형화 및 고부하 연소를 실현할 수 있으며 중·소형의 중유 전용 연소보일러 및 디젤 엔진 등에서 석탄연소로의 전환에 적합하다.<sup>(1~4)</sup>

\* 동아대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 창원전문대학 자동차과

\*\*\* 회원, 동아대학교 기계공학과

E-mail : sschung@daunet.donga.ac.kr

TEL : (051)200-7654 FAX : (051)200-7656

그러나 CWM의 연소 과정은 각 입자에 대한 수분의 증발, 휘발분의 방출 및 연소, 차(char)의 연소로 이루어지는 다단계를 거치기 때문에 액체 연료에 비하여 훨씬 복잡한 연소기구로 알려져 있다. 기존의 CWM 연소에 관한 연구는 현수법에 의한 단일액적이거나 각종 미립화 법에 의한 다수액적에 관한 실험으로서, 이들 대부분이 각 연소과정들의 상호 관련성을 배제한 독립된 연소과정을 연구대상으로 접근하였거나 또는 주 연소기간인 화연소에 중점을 두고 이를 대상으로 연구를 행하여 왔다.<sup>(5,6)</sup> 그러므로 CWM 액적의 연소에서 전반기의 수분의 증발 및 휘발분의 방출과 연소 등이 이후에 진행되는 화의 연소 및 전체 연소과정에 미치는 영향이 상당함에도 불구하고 이에 관한 구체적인 연구결과는 거의 없는 실정이다.

CWM 액적이 갑자기 고온의 연소분위기 중에 노출되면 수분증발에 이어서 휘발분의 방출 및 연소가 일어나고 이로 인해 액적은 높은 기공률을 가지게 된다.<sup>(7)</sup> 또한 기공률은 분위기의 온도, 미분탄과 물의 조성비, 그리고 액적의 초기직경 등에 따라 변할 것이며, 결과적으로 CWM의 전체 연소율에 영향을 미쳐 기존의 액체나 기체 연료의 연소에 비하여 훨씬 복잡한 연소메커니즘이 될 것이다.

따라서 본 연구는 CWM 분무연소에 관한 기초 데이터를 얻기 위해 연소가 진행됨에 따라 변화·성장하는 다공구조에 주목하고, CWM 단일액적을 석영사나 열전대에 현수하여 고온의 연소분위기에 노출시킨 후 화연소에 이르기 이전의 연소거동, 즉 수분증발 및 휘발분의 방출 및 연소에 따른 CWM 단일액적의 내부온도변화, 직경변화, 기공률, 그리고 연소율 등을 측정함으로써, 전반기 연소과정이 CWM의 전체 연소에 미치는 영향을 규명하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 CWM의 연소특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 CWM 단일액적의 연소분위기를 조성하기 위한 평면화염버너, 액적이 연소분위기 중에 노출되는 시간을 제어하기 위한 연소시간 제어부, 연소가 진행중인 액적의 직경측정

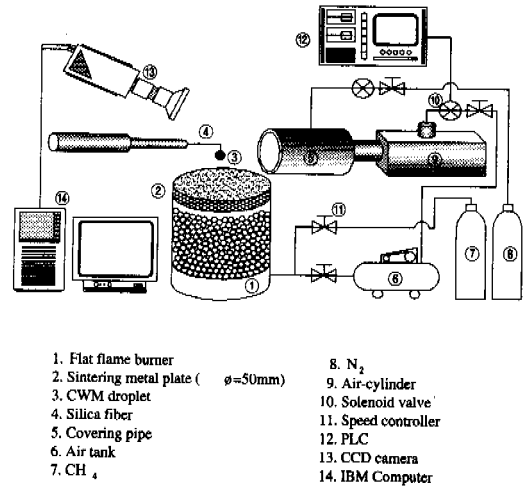


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

및 연소현상을 관찰하기 위한 가시화 장치, 그리고 액적의 내부온도를 측정하는 장치 등으로 구분된다.

평면화염버너는 CWM 액적의 연소 분위기를 형성하기 위한 것으로서, CH<sub>4</sub> : 공기의 당량비 ( $\phi$ )를 1로 조절한 후 혼합실을 거치면서 혼합기체 상태로 버너 내부에 공급된다. 버너 내부에 들어온 가스는 직경 3mm의 스틸볼을 거치면서 재차 충분히 예혼합되어 상부의 소결금속판(sintering metal plate)을 통과하면서 평면화염을 형성시킨다. 평면화염의 온도분포를 소선경 300 $\mu\text{m}$ 의 Pr 열전대를 사용하여 CWM 액적이 위치할 버너 중심의 상부 25mm 지점에서 측정된 결과, 반경 5mm 이내에서 약  $\pm 5\text{K}$  정도의 오차를 보였다.

액적이 고온의 연소분위기 중에 노출되는 시간을 인위적으로 조절하기 위한 제어기는 시간 제어 성능이 10ms인 PLC(programmable logic controller ; MASTER-K30H, LG산전)를 사용하였다. PLC는 에어실린더와 차폐관(covering pipe)에 부착되어 있는 솔레노이드 밸브를 작동시켜 액적의 연소시간을 제어한다.

Fig. 2는 연소가 진행되는 동안 액적의 내부온도 변화를 측정하기 위한 장치의 개략도이다. 액적 내부의 온도변화를 계측하기 위하여 소선경이 30 $\mu\text{m}$ 이고 비드(bead)부의 직경이 50 $\mu\text{m}$ 인 Pr 열전대(Pt, Pt-13% Rh) 끝에 CWM 단일현수액적을 형성한 후, 연소가 진행될 때 발생하는 열기전력의

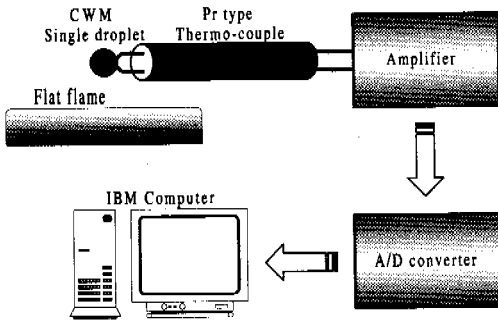


Fig. 2 Apparatus for measuring internal temperature of CWM droplet

변화를 앰프로써 증폭하고 A/D Converter를 거쳐 PC에서 저장·분석하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 CWM 액적의 연소과정을 관측하기 위하여 직경이 약 100 $\mu$ m인 석영사를 사용하였고, 액적의 내부온도변화를 계속하기 위하여 소선경 30 $\mu$ m, 비드(bead)부의 직경이 약 50 $\mu$ m인 Pr 열전대를 사용하였다. 액적은 석영사 끝에 가능한 한 구에 가까운 형상이 되도록 생성시켰으며, 이때 액적의 초기직경은 1.3mm~2.0mm 정도이다.

CWM 액적은 버너 중앙의 상부 25mm에 위치하고, 평면화염에 노출되기 전까지는 차폐관(covering pipe)으로 덮여 있으며 또한 관내부에 불활성 기체인 질소를 공급하여 연소반응을 억제시킨다. PLC의 신호에 의해 에어실린더가 작동함에 따라서 액적을 덮고 있던 차폐관이 이동하면 액적은 평면화염 중에 노출됨과 동시에 연소를 시작하며, 설정 시간이 지나면 차폐관은 다시 이동하여 CWM 단일액적의 연소를 강제적으로 종결시킨다.

CWM의 가시적인 연소과정에서 대표적인 것은 화염의 형태 및 액적직경의 변화이다. 본 실험에서는 CWM 연소과정을 CCD카메라로 촬영하여 동영상 캡처 보드를 통해 PC에 30fps, 640×480pixel 크기의 동화상으로 실시간 저장하고, 이를 다시 시간경과에 따라 각 프레임으로 나눈 영상을 대형모니터 상에서 분석하는 방법을 택하였다. 위와 같은 방법으로 저장된 영상은 실물에 비해 약 10.5배로 확대되어 나타나는데, 이를 그

Table 1 Experimental parameters and conditions

Parameters		Conditions
Initial diameter of droplet		1.3~2.0mm
Flat flame	Equivalence ratio	$\phi = 1$
	Temperature	1173K, 1373K
Composition ratio		Coal:Water:Additive = 55 : 44 : 1

Table 2 Assistance ratio of raw coal

Analysis items	Samples	Dong-jin
Elementary substances (Dry basis:Wt%)	Carbon	73.5
	Hydrogen	4.2
	Oxygen	12.1
	Ash	8.8
	Etc	1.4
Combustion characteristics	Ignition temp.(K)	580
	Ending combustion temp.(K)	976
	Combustible matter (Wt%)	91.2

래픽 프로그램의 필터링 기법으로써 액적의 직경변화를 계속하였다.

또한 시간 경과에 따른 CWM 액적의 질량변화는 계측범위가 0.1mg인 전자저울(HM-200, AND)을 사용하여 연소 이전의 초기 액적질량을 측정 한 후 0.5초 간격으로 20초까지 3회 반복 측정하여 평균값을 취하였다.

2.3 실험조건

Table 1은 실험조건과 변수를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 CWM은 미분탄과 물을 질량비 55%, 44%의 비율로 넣고, 비이온계 계면활성제인 T-40을 1% 첨가한 다음 이를 초음파 진동기를 이용하여 약 1시간동안 혼합하였다.

CWM에 사용되는 미분탄은 200mesh의 체를 통과한 것을 사용하였고, 또한 그 형상이 구형인 것과 막대형상의 것이 섞여 있기 때문에 위의 과정을 반복하여 입자크기가 충분히 미세해지

게 하였다.

CWM 액적의 분위기 온도는 당량비 1인 예혼합가스의 공급량을 조절하여 1173K와 1373K로 각각 설정하였고, 이때 발생하는 액적 주위의 유속변화와 가스의 조성은 실험에서 고려치 않았다.

Table 2는 본 실험에서 사용된 미분탄의 조성을 나타낸 것이다. 미분탄 중에는 가연성분인 탄화수소의 비율이 77.7% 이고, 불연성분인 회분이 8.8%, 그 외 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등으로 구성되어 있으며, 약 12.1%의 산소를 함유하고 있다. 따라서 본 실험에서 사용된 CWM의 가연성분은 회분을 제외한 전 질량의 96.2%가 되고 이 값은 CWM 액적이 완전히 연소할 경우의 종료치로 생각할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 CWM 액적 연소과정의 가시화

분위기온도 1373K, 초기직경 1.7mm인 CWM 액적의 시간경과에 따른 연소과정을 Fig. 3에 나타내었다.

본 그림에서 수분증발기간은 액적이 고온분위기 중에 노출되어 미세폭발(micro-explosion)이 존재할 때까지의 기간, 가시적 포위화염(envelope flame)이 일어나기 전까지를 착화지연, 포위화염이 존재하는 기간을 휘발연소기간, 포위화염이 완전히 사라진 이후부터를 착연소기간으로 각각 정의하였다.<sup>(8)</sup>

액적이 고온장에 노출된 이후 약 0.03초까지는 액적 내에 존재하는 수분이 비점까지 가열되는 구간이다. 이 기간동안에는 석탄중의 알카리염이 물에 용해되는 것 이외에는 석탄 입자는 반응하지 않고, 크기에 조그만 변동이 있을 뿐이다.

액적이 평면화염에 노출되면 약 0.03초에서 0.6초에 이르기까지 액적 내부에 존재하는 수분의 증발로 인한 압력상승에 기인한 미세폭발이 발생하고, 이와 동시에 분출된 가연성분으로 인하여

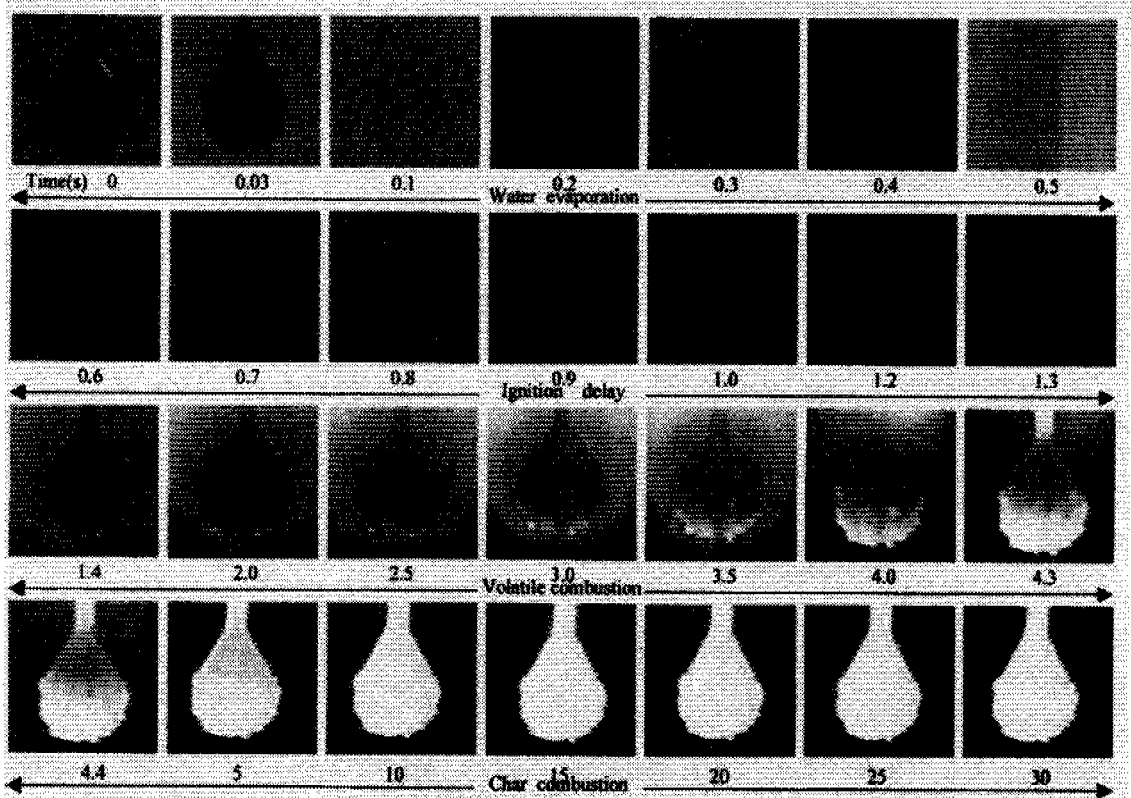


Fig. 3 Combustion process of CWM droplet ( $d_i=1.7\text{mm}$ ,  $T_s=1373\text{K}$ )

액적 주위에는 순간화염이 2~4차례 나타난다. 미세폭발과 동시에 액적의 외형변화가 심하게 일어나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상으로 미루어 미세폭발의 영향은 주위 연소장의 엔탈피를 급격히 높여 액적 자신의 연소현상을 촉진시키고, 또한 액적에서 누출되는 가스로 인하여 액적의 기공률을 높여 액적 내부로의 산화제의 유입 및 열의 확산에 유리하게 작용하여 액적의 연소율을 높이는 데 크게 기여할 것으로 생각된다.

0.6초부터 1.3초까지에 해당하는 착화지연기간은 CWM에 포함된 휘발분의 착화온도에 도달할 때까지의 기간으로 판단된다.

1.4초부터 4초까지의 휘발연소기간에는 착화지연기간 동안에 발생한 가연성 휘발분의 연소에 의한 포위화염이 관찰된다. 이 기간 동안에는 액적 내부의 휘발분이 외부로 방출·연소되면서 액적의 부풀음(swelling) 현상이 발생하고 또한 기공이 형성될 것이다.

휘발연소기간 후반부터는 전형적인 고체연소의 형태를 보여 화연소로 생각되며 연소속도는 매우 느리게 진행되고, 액적의 직경 또한 매우 느리게 감소하다가 20초 이후부터는 거의 일정하게 유지되는 경향을 보인다.

### 3.2 CWM 액적의 내부온도 변화

CWM 액적이 고온의 연소분위기 중에 노출되면 액적은 내부의 수분 증발에 기인한 미세폭발, 착화지연, 휘발분의 방출 및 연소, 그리고 화연소로 이어지는 반응이 순차적으로 진행되는데, 이러한 과정들은 액적 내부의 온도변화와 밀접한 연관성을 지닌다. 특히, 수분증발 및 휘발분의 방출은 액적 내부의 기공률 생성에 밀접한 연관성을 가져 이후의 화연소에 직접적인 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Fig. 4는 분위기온도 1173K, 액적의 초기직경 1.5mm, 2.0mm인 조건에서 시간경과에 따른 액적 중심의 온도변화를 나타낸 것이다.

Fig. 3의 가시화사진과 초기직경 1.5mm 조건의 온도변화를 서로 비교하면 0초부터 0.5초까지 기간인 수분증발기간은 약 373K으로 온도가 일정하다. 이는 수분이 증발로 인해 액적 내부의 온도가 일정한 것으로 판단되며, 0.6초부터 1.4초까지는 액적의 내부온도가 600K까지 증가하는 동안 화염의 사진에서는 아무런 변화가 관측되지

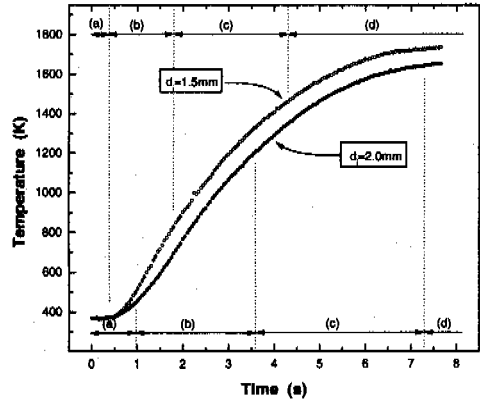


Fig. 4 Internal temperature changes of CWM single droplet ( $T_s=1173K$ ): (a) Water evaporation, (b) Ignition delay, (c) Volatile combustion, (d) Char combustion

않는다. 이는 미분탄의 착화온도가 580K인 점을 감안하면 수분의 방출 후 CWM의 고체연소에서 열분해가 일어나기까지의 기간으로서 화염사진과 액적 내부의 온도변화가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이후에 휘발분연소기간 동안에 급격히 가열되어 1500K까지 증가한 후 화연소로 진행되는 4.5초부터 7.5초까지는 1700K까지 서서히 증가하는 경향을 보인다. 이러한 결과로 미루어 액적의 가시화 및 액적 내부온도 검출의 타당성을 확인할 수 있다.

### 3.3 연소기간의 변화

액적이 온도 1173K, 1373K의 평면화염에 노출된 이후에 분위기온도 및 초기직경에 따른 수분증발기간, 착화지연기간, 휘발연소기간의 변화를 화상 분석을 통하여 Fig. 5에 나타내었다.

액적의 각 연소기간들은 초기직경이 증가함에 따라 동시에 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 액적의 열용량과 무관하지 않은 것으로 생각된다. 분위기온도 1173K의 경우를 보면 액적의 초기직경이 증가할수록 휘발연소기간에 대한 수분증발기간 및 착화지연기간은 각각 6~15%, 40~50%의 증가를 보이고, 1373K의 경우에는 각각 10~17%, 26~32%의 증가를 보인다. 그러므로 휘발연소기간에 대한 수분증발기간은 분위기온도

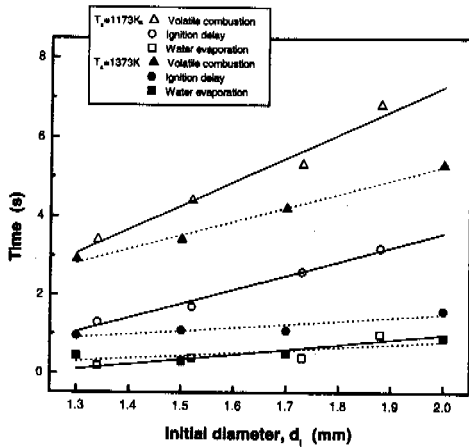


Fig. 5 Period of each combustion process of CWM single droplet

의 영향은 거의 없는 것에 비해 착화지연기간은 분위기온도가 증가함에 따라 약 20% 정도 단축됨을 보여 분위기온도와와의 관련성이 더욱 크다고 할 수 있다.

3.4 액적직경 및 질량변화

Fig. 6, 7은 분위기온도 1173K, 1373K인 조건에서 CWM 액적의 직경을 변화시켜 시간경과에 따른 초기 직경  $d_i$ 에 대한 각 순간의 직경  $d$ 와의 비를 나타낸 것이다.

본 그림에서 최대직경의 위치는 액적이 고온의 분위기에 노출된 이후 약 2~6초 사이에 존재하며, 초기직경이 작을수록 분위기온도가 높을수록 앞당겨짐을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5의 연소시간 이력과 비교하면, 연소중의 액적의 직경이 최대가 되는 시기는 각 액적에서 휘발연소가 일어나는 기간의 약 60~75% 시점에 위치하였다.

동일한 분위기온도에서 액적의 초기 직경이 작을수록 최대직경은 10% 정도 증가하고, 5~8초 사이에는 최대 직경치의 15~20% 정도가 급속히 감소하는 경향을 보이며, 10초부터의 직경변화는 거의 일정하게 유지된다.

이상과 같이 분위기 온도가 증가할수록 최대 직경치가 앞당겨지는 것은 액적내부까지의 열전달량이 커져 미세폭발 및 탈휘발화 과정이 보다 급속하게 진행되기 때문으로 생각된다. 또한 액적의 초기직경이 증가할수록 전체적인 직경변화

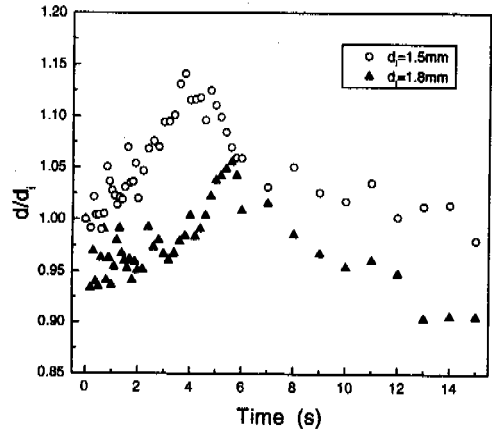


Fig. 6 Variation of the diameter of CWM droplet ( $T_s=1173K$ )

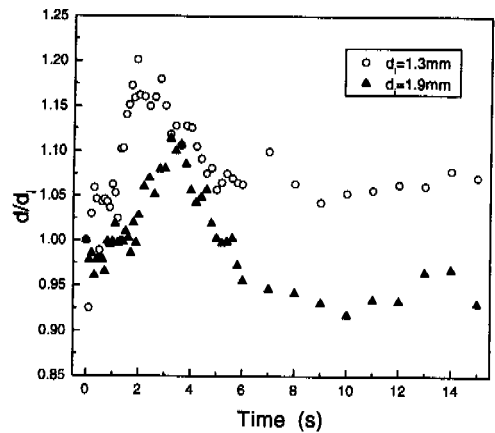


Fig. 7 Variation of the diameter of CWM droplet ( $T_s=1373K$ )

의 감소는 내부로의 열전달에 의한 팽창보다 액적의 수분증발에 의한 표면경화가 상대적으로 급속하게 진행되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 분위기온도가 1173K, 1373K이고 액적의 초기직경이 1.5mm, 1.9mm인 CWM 액적의 시간경과에 따른 질량변화를 나타낸 것이다.

각각의 초기질량은 3mg과 5.5mg이다. 두 조건 모두 연소시작부터 10초 동안에 급속한 질량의 감소를 보인 후, 이후부터는 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 초기질량이 클수록 질량 감소율은 커지고, 10초대에서 3mg의 경우 초기의 77%, 5.5mg의 경우에는 60% 정도가 감소함을 보인다.

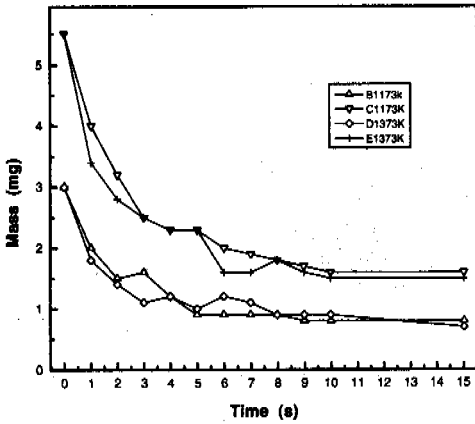


Fig. 8 Mass variation of CWM droplet

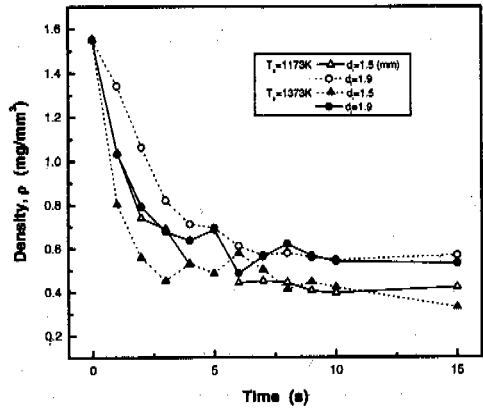


Fig. 10 Density of single CWM droplet

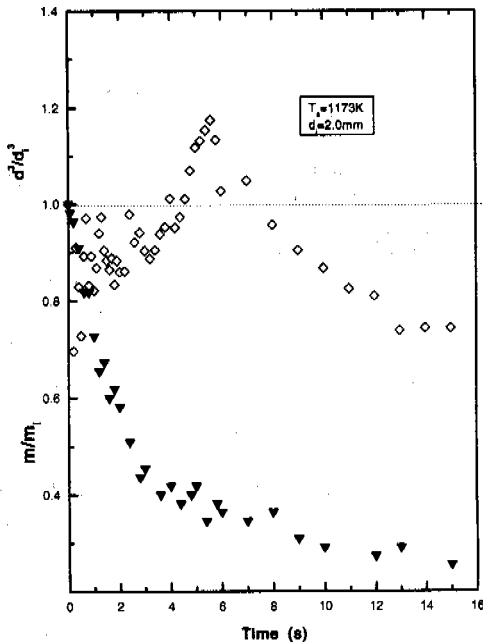


Fig. 9 Changes of volume ratio and mass ratio ( $d_1=2.0\text{mm}$ ,  $T_s=1173\text{K}$ )

Fig. 9는 분위기 온도 1173K, 초기직경 2.0mm일 때, 연소시 액적의 질량비와 부피비의 변화를 동시에 나타낸 것이다.

일반적인 액체연료와는 전혀 다른 양상을 보이는데, 특히 액적의 부피가 팽창하는 것과는 상대

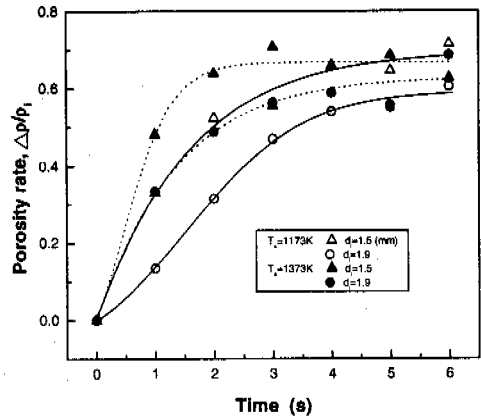


Fig. 11 Changes of Porosity ratio

적으로 그 질량은 급격하게 감소하며, 부피가 최대로 팽창하는 약 5초부터에서 질량변화는 거의 완만한 곡선을 나타낸다. 이러한 현상을 볼 때 전반기의 수분증발과 휘발분의 연소가 빠르게 진행되는 반면 후반기의 착연소는 상당히 느리게 진행되는 것을 알 수 있다.

### 3.5 CWM 기공률의 변화

분위기온도, 초기직경변화에 따른 CWM 액적의 밀도 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

조건에 관계없이 밀도변화는 초기에 급격히 진행되며 약 10초 이후부터는 거의 일정하게 유지된다. 초기 밀도의 60~70%가 5초 이내, 즉 수분의 증발기간 및 휘발연소기간 이내에 감소하고,

10초대에는 70~75%가 감소하며 이후에는 거의 일정하게 유지하는 경향을 보이므로 CWM 액적의 밀도변화는 수분증발 및 휘발연소기간 동안에 거의 결정됨을 알 수 있다. 또한 밀도변화에 미치는 분위기온도의 영향은 거의 무시할 정도이나, 같은 시간대에서 초기의 액적직경이 1.9mm에서 1.5mm로 감소함에 따라서 밀도는 10~15% 정도 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 11은 Fig. 10의 밀도변화를 이용하여 기공률을 계산한 결과를 나타낸 것이다.

동일한 분위기온도에서 직경을 1.5mm와 1.9mm로 변경시킨 결과 기공률은 약 15% 정도의 차이를 보인다.

### 3.6 CWM 액적의 질량연소율

Fig. 12는 분위기온도가 1173K, 1373K에서 액적의 초기직경이 1.5mm, 1.9mm인 CWM 액적의 시간경과에 따른 질량연소율을 나타낸 것이다.

연소시작 후 2~4초 사이에는 조건에 관계없이 가연성 전체 질량의 약 50%가 연소하며, 수분증발기간과 휘발연소기간에서 60~70%, 그리고 약 10초 이후부터는 질량연소율의 변동이 거의 없어 CWM 액적 전체가 연소한 것으로 생각된다. 이와 같이 수분증발기간과 휘발연소기간에서의 연소량이 60~70%를 차지하는 것은 액적 중의 수분함유량이 44%일 뿐만 아니라, 이 기간동안에 형성되는 액적 중의 기공으로 주변공기의 유입이 활발하게 진행되고 표면적증가로 인한 휘발분의 방출과 연소를 촉진시켰기 때문으로 생각된다. 이것

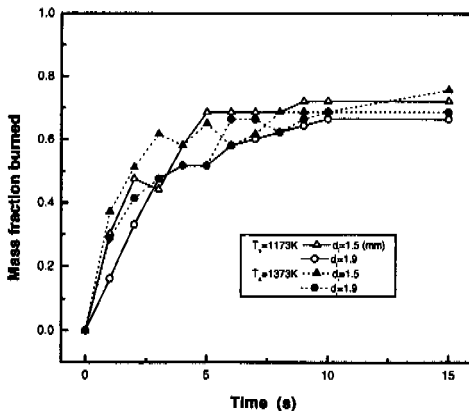


Fig. 12 Mass fraction burned of single CWM droplet

로 미루어 이전에 계속된 기공률의 증가는 질량연소율의 증가와 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

CWM 액적을 평면화염 하류의 고온분위기 중에서 연소시켜, 그 연소과정을 가시화시스템으로 촬영하고 내부온도 변화, 액적의 직경 및 질량 등을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CWM 액적의 연소과정은 수분 증발과 미세 폭발 후에 착화하고 휘발연소, 그리고 착연소로 이어지는 뚜렷한 다단계 과정을 거친다.

(2) CWM 액적의 수분증발과 미세폭발기간에서 액적내부온도는 약 373K으로 일정하게 유지되며, 휘발연소기간에서 온도구배가 가장 크고, 이 때 액적 중심부의 온도는 약 600K에서 시작하여 1500K 정도까지 상승한다.

(3) 분위기온도 및 초기직경에 관계없이 액적이 최대 팽창되는 시기는 각 액적의 휘발연소기간 중의 약 60~75% 시점에 위치하였다.

(4) CWM의 액적의 초기직경이 작을수록  $d/d_0$ 는 크고, 분위기온도가 증가할수록 초기직경에 관계없이 최대직경의 발생시기는 앞당겨진다.

(5) CWM은 초기연소시의 액적의 부피가 급격하게 팽창하는 구간에서 질량의 감소가 급격하게 진행되어 액체연료와는 전혀 다른 양상을 보인다.

(6) 수분증발기간과 휘발연소기간에서의 연소량은 60~70%를 차지하므로 전반기 연소가 전체연소에 미치는 영향은 크다고 할 수 있다.

(7) CWM의 기공은 착연소 이전에 대부분 형성되므로 전반기연소와 밀접한 관련성을 지니며 이후의 착연소에도 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- (1) Phatak, R. G. and Gurney, M. D., 1985, "Investigation of Diesel Fuel Injection Equipment Response to Coal Slurry Fuel," *ASME Paper No. 85-DGP-17*.
- (2) Yu, T. U., Lai, Beer, M. C., 1989, "Injection and Atomization of Coal Water Slurry in High Pressure Diesel Environment in Coal Fueled Diesel Engines," *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 64, pp. 12~20.



- (3) Mansour A. and Chigier N., 1997, "Design of Atomizers and Burner for Coal-Water Slurry Combustion," Report by Carnegie-Mellon Univ. and Pittsburgh, PA (United States), Dept. of Mechanical Engineering.
- (4) 강인호, 1995, "노즐振動을 이용한 CWM의 均一液滴生成에 관한 研究," 동아대학교 대학원 석사학위논문.
- (5) Yamamoto Takashi, 1989, "A Study on the Combustion of Coal Char Agglomerates in a Combustion Gas Environment," KEIO Univ. Master's Thesis.
- (6) 안국영, 백승욱, 김관태, 1993, "CWS액적의 증발 및 점화에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1246~1252.
- (7) Simons, Girard A., 1982, "The Pore Tree Structure of Porous Char," *19th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 2067~2076.
- (8) 변도영, 조주형, 백승욱, 안국영, 1997, "Al/액체연료 슬러리 액적의 연소와 미세폭발 (I)," 대한기계학회논문집, 제21권, 제12호, pp. 1576~1585.