한국에너지공학회지(1994), 제3권 2호
Energy Engg. J(1994), Vol. 3, No. 2 pp. 130~150

총 설

석탄-물 혼합연료(CWM)의 분무 특성

노남선 · 신대현 · 김광호
한국에너지기술연구소 연료기술연구팀

Atomization Characteristics of Coal-Water Mixture Fuel

Nam-Sun Roh, Dae-Hyun Shin and Kwang-Ho Kim
Fuel Technology Research Team, Korea Institute of Energy Research, Taejon, 305-343, Korea

Abstract— Coal-water mixture(CWM) fuel has attracted much attention as a substitute fuel for oil by which high economics and short-term commercialization might be realized in comparison with other coal conversion technologies. There are many factors that affect the CWM combustibility, such as the physical properties of CWM, the performance of atomizer and burner, operating conditions, capacity and load of the boiler, etc. Particularly, atomization quality is extremely critical to achieving acceptable carbon conversion efficiency of CWM fuel and maintaining the flame stability, because the coal particles in the CWM droplets burn as agglomerates. This paper presents the R&D results about the CWM atomization characteristics, including the significance of CWM atomization quality, the atomization and combustion mechanism, the type of CWM atomizer, size and size distribution of CWM droplets and some factors that influence the atomization performance.

1. 서 론

석탄-물 혼합연료(CWM : coal-water mixture)는 고체인 석탄을 액체 상태로 변형하여 연소시킴으로써 석탄이 가지고 있는 많은 문제점과 불편함을 상당히 해결할 수 있을 뿐 아니라 석탄의 가스화(gasification)나 액화(liquefaction) 기술에 비하여 경제성이 높고 대규모의 시설 투자비가 필요없이 단기간에 산업체 및 발전용 보일러에 적용할 수 있는 대체 에너지원의 하나로 평가되고 있다[1,2].

CWF(coal-water fuel) 또는 CWS(coal-water slurry)라고도 호칭되는 CWM연료는 60~70wt.% 정도의 분쇄탄과 물, 그리고 연료의 안정성을 높이고 점도를 낮추기 위한 소량의 첨가제로 구성되어 있다. 석탄은 보통 74μm 통과분이 약 75 wt.% 이상 되도록 분쇄되고, CWM의 유동성(fluidity)을 증가시키기 위해 사용되는 첨가제로는 주로 물에 녹는 계면활성제(water soluble surfactant)가 많이 사용된다.

1970년대 후반기부터 미국을 중심으로 한 선진국들로부터 본격적인 연구가 수행되기 시작한 CWM은 제조에서부터 연소 후 회재 처리까지의 전체적인 공정에 대하여 각 항목별로 활발한 기술개발이 진행되어 실용화 가능성은 충분히 입증된 상태이나 장기적이고 안정적인 대량보급을 위해서는 아직도 세부 기술별로 해결해야 할 문제점이 많은 것으로 보고되어 있다. 일본이나 이태리와 같이 우리나라와 에너지자원 사정이 비슷한 국가들과 석탄 자원이 풍부한 소련, 중국 등에서는 실용화를 위한 투자와 기술개발이 현재까지 꾸준히 추진되어 일부 산업체 보일러와 발전소 등에서 부분적으로 상용화 단계에 도달한 것으로 알려지고 있다[2,3].

연소는 CWM관련 기술개발 분야 중에서도 가장 핵심적인 항목이며, CWM의 연소 효율, 즉 탄소 전환율(carbon conversion efficiency)은 연료의 성상, 분무기(atomizer) 및 버너의 성능, 보일러의 운전 조건, 보일러 구조 등에 따라 많은 차이가 발생하나, 보통 93~99%의 범위이다. 또한 보일러 열효율은 연료 중의 수분에 의한 손실열과 미연 탄소분때문에 중유에 비해 약 10% 정도 감소하며, 부하 조절비(turndown ratio)도 최대 4 :1 정도로 중유에 비해 상당히 낮다[4~6]. 따라서 화염의 안정성과 부하 조절비를 높이고 미연탄소분의 발생을 감소시켜 오일연료와의 성능 차이를 줄이는

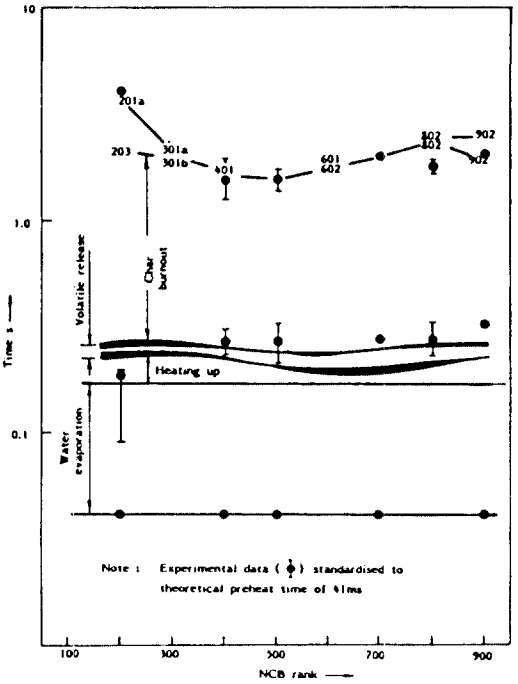

Fig. 1. Variation of burnout times with coal rank for a 500mm drop[13].

것은 CWM연료의 상용화를 위하여 매우 중요한 과제이다. 특히 CWM의 경우는 여러 개의 석탄 입자들과 물이 합체되어 단일 석탄 입자보다 직경이 훨씬 커진 액적(droplet)이 연소 과정을 거치게 되므로 분무기의 분무 성능(atomization quality)은 CWM연료의 연소 효율을 높이고 안정된 화염을 유지하는 데 결정적인 역할을 하는 것으로 확인되었다[7~9].

따라서 본 내용에서는 현재까지 국내외에서 발표된 연구 결과들을 토대로 분무성능과 연소효율과의 관계, CWM연료용 분무기의 종류 및 특징, CWM연료의 분무 매카니즘, 분무성능에 영향을 미치는 인자, 분무액적의 크기 및 입도분포 등과 같은 CWM의 전반적인 분무 특성과 이와 관련된 기술개발 내용들을 종합하여 정리하였다.

2. CWM 분무 기술의 중요성

2-1. CWM연료의 연소 매카니즘

CWM연료는 무게비로 30% 이상의 수분을 포함하고 있기 때문에 수분의 건조 과정이 포함된 다음의 4 단계 과정을 거쳐서 연소 과정이 진행된다고 볼 수 있다[10~13].

1) 분무된 CWM 액적의 가열 과정
2) 연료 중에 포함된 수분의 증발 과정
3) 휘발분의 방출 및 연소 과정
4) 고정탄소의 연소 및 회분의 생성 과정

CWM의 연소 매카니즘에 대하여는 여러 형태의 측정방법을 통하여 많은 실험모델들이 제안되었으나 현재까지 정확한 현상 파악은 이루어지지 못했다.

Mattews와 Jones[13]는 모델식과 실험을 통해 CWM 액적에 대한 각 연소 단계별 소요시간을 rank에 따라 측정하였다(Fig. 1). 직경이 500μm인 액적의 예열 시간은 40msec, 수분의 증발시간은 130msec 정도이고, char의 연소시간은 중탄화 석탄의 경우 1msec에서 저탄화 및 고탄화 석탄의 경우 2~3msec까지 변하는 것으로 보고되었다.

Yu와 Beer[14]는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 CWM 액적이 연소되면서 생성된 회재가 전열면에 부착되는 과정을 설명하였고, Srinivasachar 등[15]은 층류반응기(laminar flow reactor)를 이용하여 5~500 μm 범위의 CWM 액적을 고속촬영법(high speed cinematography)으로 추적한 결과 Fig. 3과 같은 CWM의 연소 매카니즘을 제안하였다. 전체 과정은 8 단계로 구분되어 설명되었고 휘발분의 방출에 의해 입자들이 고속으로 회전하는 현상을 포함하여 연소과정을 해석한 것이 이 모델의 특징이다.

Tokuda 등[16]은 Fig. 4와 같이 CWM 액적의 크기에 따라 서로 다른 과정을 거치는 연소 모델을 제시하였다. 이 모델에 의하면 액적은 크고 작은 여러 개의 석탄 입자들로 구성되어 액적은 석탄의 입경보다 크고, 이 입자들은 석탄의 물성과 노 내의 조건 등에 따라 연소과정이 틀리게 된다. 즉 노 내의 온도가 낮아 액적이 느린 속도로 가열되고 석탄의 응집성이 강할 경우 입자들 간의 응집이 발생하여 커다란 한 개의 입자 상태로 연소되어 연소 시간이 길어진다. 반면에 순간적으로 강한 열을 받으면 입자 내부에 존재하는 수분 또는 휘발분의 팽창에 의해 개개의 석탄 입자 상태로 분산되어 연소가 촉진된다.

위에서 예로 소개한 몇가지 연소모델과 그 밖의 많은 연구결과[4, 11, 17~19]의 공통점은 CWM연료에서는 단일의 석탄 입자가 아닌 여러 개의 입자들이 뭉쳐서 형성된 분무 액적들이 앞에서 언급한 4 단계의 연소 과정을 거쳐 최종적으로 회재를 발생시킨다는 것이다. 따라서 CWM의 경우에는 이러한 분무 액적의 크기를 얼마나 미세하게 유지하느냐가 탄소 전환율을 높이는 데 일차적으로 중요한 역할을 하게 된다.

2-2. 분무 성능의 중요성

앞부분에서 설명한 바와 같이 분무된 CWM은 대

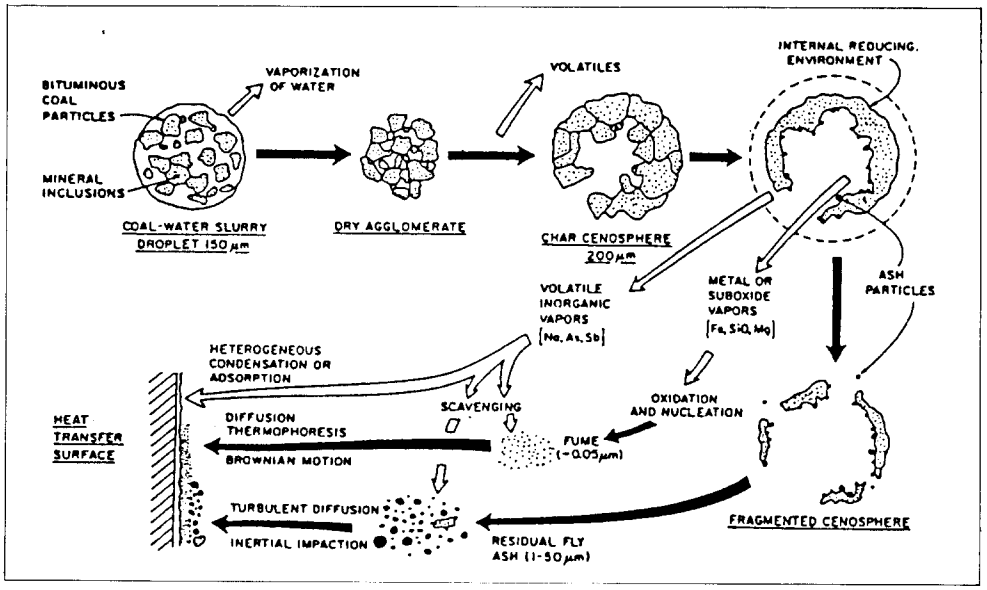

Fig. 2. Burn-out and ash deposition mechanism for a bituminous coal-water fuel droplet[14].

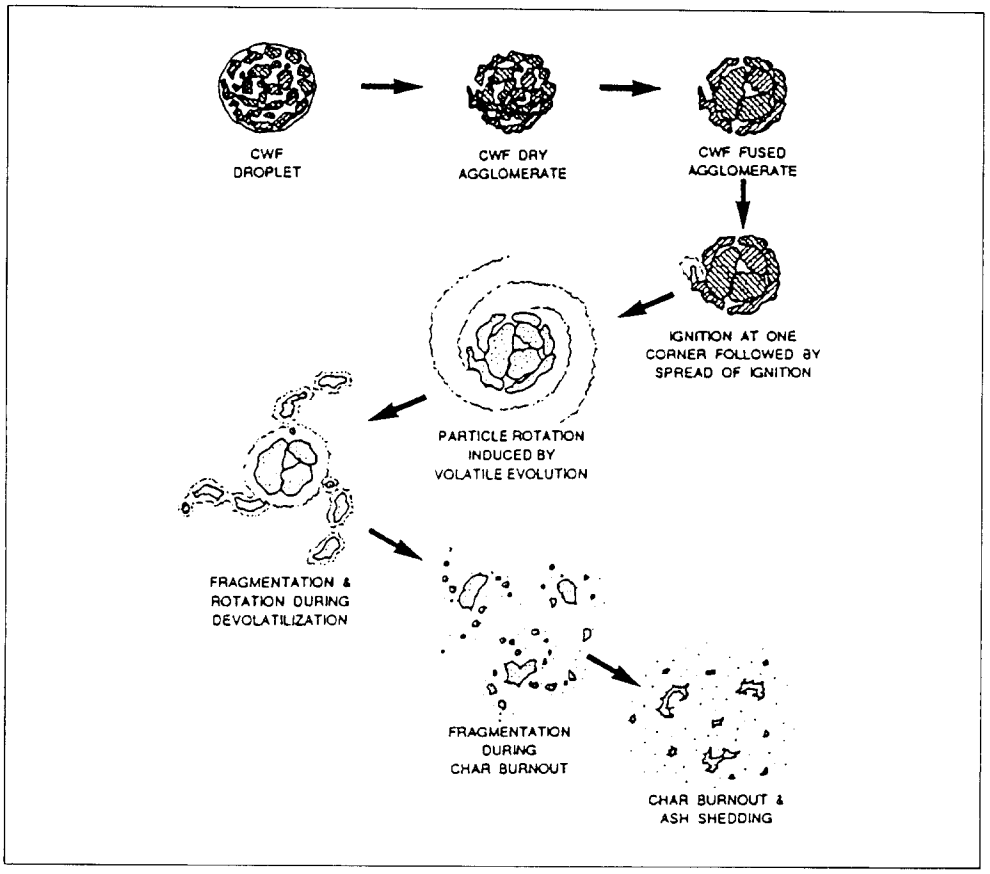

Fig. 3. Mechanism of CWM droplet combustion[15].

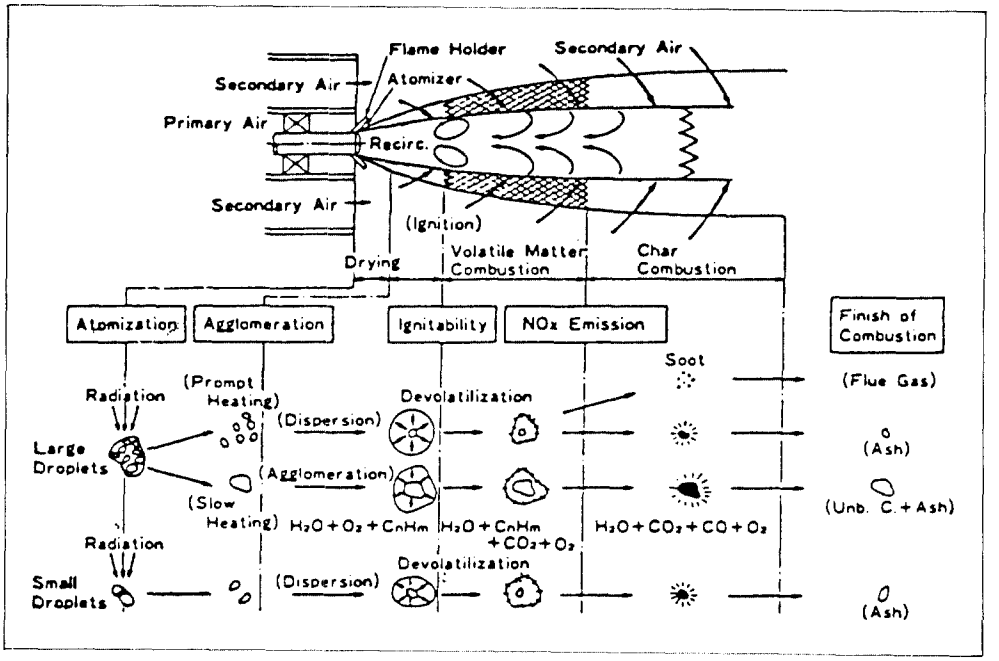

Fig. 4. Combustion model of CWM[16].

부분의 석탄 입자들이 수분과 함께 덩어리(agglomerate) 형태로 뭉쳐서 연소가 진행되므로 분무 성능을 향상시켜서 미세한 액적을 유지시키는 것은 CWM연료를 효과적으로 연소시키는 데 있어서 빼놓을 수 없는 매우 중요한 항목이다.

분무 액적의 입도분포는 CWM의 연소효율 즉 탄소전환율과 직접적인 관련이 있을 뿐 아니라 비산분진의 입도분포, 점화 안정성(ignition stability), 부하 조절비(turn-down ratio)에도 직접적인 영향을 미치며, 슬래깅(slagging), 파울링(fouling), 보일러의 대류부에 위치한 튜브의 마모, 전기집진기의 효율 등도 간접적으로 영향을 받는다[7,20,21]. 즉 액적이 미세할수록 버너와 가까운 부위에서 점화가 되어 화염의 안정성과 부하조절비가 커지고, thermal NO_x의 발생이 줄어들 뿐 아니라 표면/부피비가 커져서 연소효율이 높아진다. 또한 분무 액적이 미세하면 미연탄소분 함량이 적고 크기가 작은 비산분진이 발생되므로 슬래깅, 파울링, 대류부 튜브의 마모현상이 감소하고 비산분진의 resistivity가 상승하여 전기집진기의 효율이 높아지는 효과가 있다. Fig. 5는 액적의 평균입경이 탄소전환율과 회재의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것으로서 액적의 크기가 작을수록 연소효율이 높아지고 회재의 평균직경은 감소하는 경향을 보여주고 있다[7].

3. CWM연료용 Atomizer

분무기는 크게 압력식 분무기(pressure atomizer), 회전식 분무기(rotary atomizer), 2유체 분무기(twin-fluid atomizer)의 3 종류로 구분할 수 있으며 2유체 분무기는 고속으로 흐르는 공기나 스팀에 의해 액체를 분무시키는 air-assist atomizer와 airblast atomizer로 나눌 수 있다[20]. air-assist atomizer는 다시 가스와 액체가 분사되기 전에 노즐 내부에서 혼합되는 내부혼합식(internal mixing type)과 discharge orifice 직전이나 그 바깥 부위에서 두 유체가 충돌하는 외부혼합식(external mixing type)의 두가지 형식으로 구분된다.

CWM연료와 중유를 분무 측면에서 비교해 보면 동일한 용량의 보일러를 기준으로 할 때 CWM의 분무량이 중량기준으로 중유에 비해 2배 이상이고, 점도도 CWM이 중유의 5~20 배 정도로 높다. 따라서 CWM연료의 분무에는 중유에 비해 상대적으로 높은 분무압력과 공연비(air/fuel ratio)가 요구되며 석탄 입자에 의한 마모현상도 심하게 발생한다[1,2,3]. 이러한 분무 조건상의 차이점으로 인하여 CWM연료의 분무에 중유용 분무기를 그대로 사용하는 것은 불가능하며, 실제로 CWM연료용 분무기로는 중유와 같은 액체연료용 분무기를 개조 또는 일부를 보완하여 이용하기도 하고 CWM의 분무조건에 적합한 형태와 구조를 가진 분무기를 각 업체 및 기관별로 제작하여 사용하고 있다.

지금까지 발표된 자료들을 살펴보면 점도가 높은 액체연료의 경우와 마찬가지로 압력식 분무기는

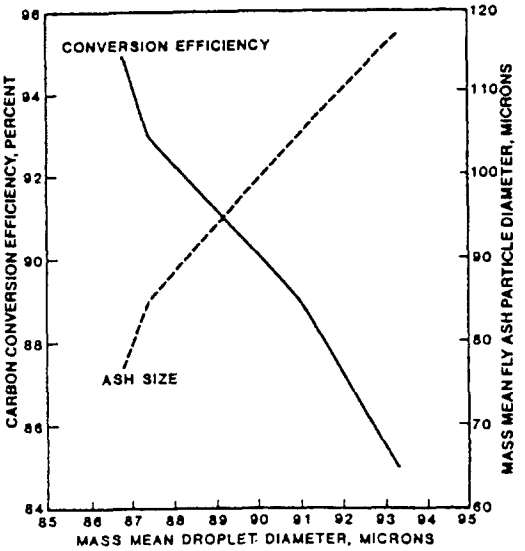

Fig. 5. Effect of CWM atomized droplet size on carbon conversion efficiency and fly ash size[7].

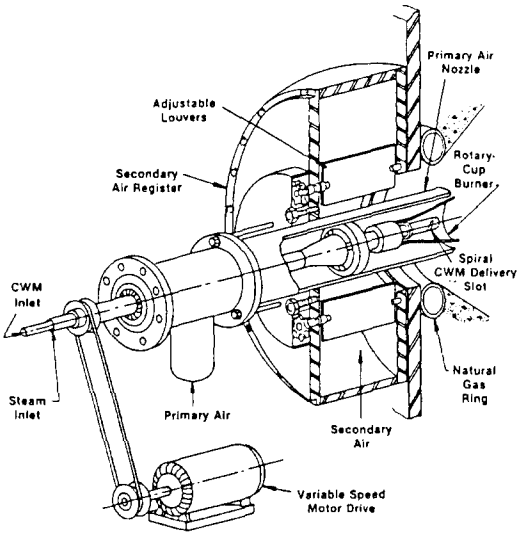

Fig. 6. Rotary atomizer and air register arrangement[26] (Pittsburgh Energy Technology Center).

CWM연료의 분무에는 적합치 않으며 거의 대부분이 2유체 분무기를 채택하고 있다. 특히 그 중에서도 내부혼합식 분무기가 가장 많이 사용되고 있는 것으로 보고되었다.

외부혼합식 분무기도 내부혼합식 다음으로 많이 이용되며, airblast atomizer를 이용하여 CWM을 가스 터빈용 연료로 활용하려는 연구도 진행되고 있다. 또한 소수에 불과하긴 하지만 회전식 분무기[24~26], 초음속 분무기[27], opposed-jet atomizer[29] 등과 같은 특수한 분무기를 적용한 사례도 보고된 바 있다. CWM연료용 분무기 중에서 대표적인 것들을 각 형식별로 간략히 소개하면 다음과 같다.

3-1. Rotary Atomizer

회전식 분무기를 이용하여 CWM의 분무특성을 실험하고 보일러에서 연소시켜 성능을 테스트한 사례들은 주로 CWM에 대한 연구가 본격적으로 추진되기 시작한 80년대 초기에 발표된 자료에서 드물게 발견할 수 있으며 그 후로 이에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없다.

Fig. 6은 미국의 PETC(Pittsburgh Energy Technology Center)에서 실험한 회전식 분무기와 버너의 구조를 나타낸 것이다[26]. 성능실험은 77HP 규모의 보일러에서 수행되었고 93.0~96.0% 범위의 연소효율을 얻을 수 있었다고 발표되었다.

3-2. Airblast Atomizer

CWM연료용 분무기로 airblast 형식이 선정되어 연구가 진행되고 있는 것은 주로 가스 터빈용 연료로 CWM을 이용하기 위해서이며, 아직도 이 분야에 대한 기술개발은 초보적인 상태에 머물러 있다[30~32]. 특히 가스 터빈의 경우는 분무액적이 미세하지 못하면 연소 후 발생되는 회재 성분이 streamline을 따라 배출되지 못하고 터빈의 날개에 부딪혀 마모현상이 심해지므로 분무기의 성능이 아주 중요한 역할을 하게 된다.

3-3. Internal Mixing Type Atomizer

CWM용으로 가장 많이 사용되고 있으며, 연료와 분무매체가 혼합되는 위치와 분무기의 내부구조에 따라서 CWM연료용 내부혼합식 분무기를 T-jet internal mixing type, Y-jet internal mixing type, Y-jet mixing type(or intermediate mixing type), internal mixing type 등으로 구분할 수 있다. 내부혼합식은 연료와 분무매체가 분무기 내부에서 혼합되어 빠른 속도로 분사되는 특성때문에 CWM연료의 경우에는 대부분 내마모성 재질로 제작된 부품을 사용하며, 분무성능을 높이기 위해 연료와 공기를 선회시키는 구조를 많이 채택하고 있다.

Fig. 7은 Babcock & Wilcox Co.에서 개발한 T-jet internal mixing type의 분무기를 보인 것이다[33~35]. 분무기는 서로 다른 통로를 통해 공급된 연료와 분무용 공기가 T-자 형태로 합쳐지고 다시 혼합실(mixing chamber)에서 혼합된 후 노즐을 통해 분사되는 구조를 갖고 있다.

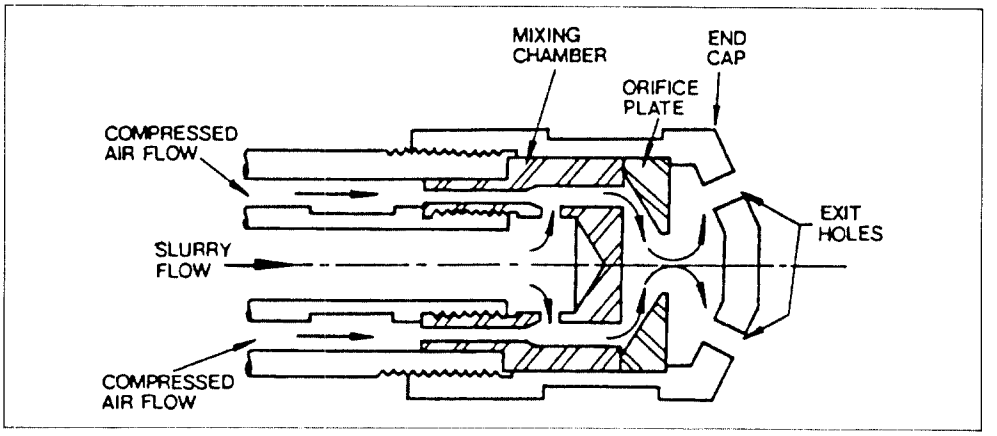

Fig. 7. T-jet internal mixing type atomizer[33](Babcock & Wilcox Co.).

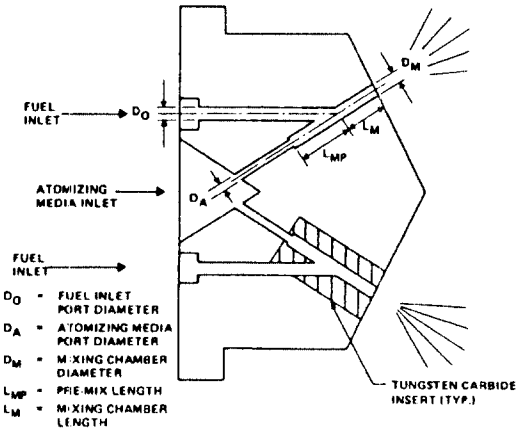

Fig. 8. Critical dimensions of Y-jet mixing type atomizer[16] (Combustion Engineering, Inc.).

Y-jet internal mixing type은 CWM과 공기가 직각이 아닌 Y-자 모양으로 교차하는 것이 T-jet internal mixing type과 다른 점이며 internal mixing type의 경우는 연료와 공기가 서로 합쳐지지 않고 각기 따로 혼합실로 공급된 후 분사되는 구조를 가지고 있다.

Y-jet mixing type은 Combustion Engineering, Inc.의 분무기를 나타낸 Fig. 8처럼 두 유체가 합쳐진 후 혼합실을 거치지 않고 그대로 분사되는 구조를 가지고 있다[36~37]. 이 분무기의 경우 공연비가 0.2일 때 CWM 액적의 MMD(mass median diameter)는 65~70μm 범위이고, 연소실험 결과 99.9% 이상의 효율을 보인 것으로 보고되었다[6].

3-4. External Mixing Type Atomizer

외부혼합식 분무기도 내부혼합식 다음으로 CWM 연료용으로 많이 채택되고 있다. 연료와 분무 매체가 중간에서 접촉하지 않고 nozzle tip에서 만나게 되므로 내부혼합식에 비하여 상대적으로 마모 현상이 적고 액체와 기체가 서로 다른 라인을 통해 공급되므로 운전 범위가 넓은 장점을 가지고 있다.

Fig. 9는 미국의 Parker Hannifin Corp.에서 개발한 CWM용 외부혼합식 분무기의 내부 구조와 액적이 생성되는 과정을 보인 것이다[38~39]. VIP(viscosity insensitive prefilmer)란 명칭을 가진 이 분무기는 연료와 같은 방향으로 선회하는 안쪽의 분무공기와 연료의 반대 방향으로 회전하는 고속의 공기에 의해 중간에서 공급되는 CWM이 심하게 전단되어 얇은 필름 형태로 CWM이 분사된다. 연료의 공급량이 0.076Kg/sec이고 공연비가 0.3 이하인 조건에서 MMD는 55~66 μm 정도로 측정되었다[40].

4. CWM연료의 분무 특성

4-1. 2유체 분무기에서의 분무 매카니즘

일반적으로 CWM연료는 분무기의 종류 및 구조, 연료 물성, 공기/연료비, 온도 등에 따라 다양한 분무 특성을 나타낸다고 보고되었다. 또한 연구자들에 의해 여러가지 형태의 분무매카니즘과 분무현상에 대한 해석이 발표되었으나 아직까지 정확한 결론이나 수학적인 접근은 이루어지지 못한 상태이다. 2유체 분무기에서의 분무 현상에 대한 대표적인 연구결과를 소개하면 다음과 같다.

Graziadio 등[41]은 연료공급량이 500Kg/Hr인 Y-jet internal mixing 형태의 분무기를 이용한 실험을 통하여 분무기 내부에서의 혼합 형태가 Mullinger와 Chigier[42]가 Y-jet mixing 형식의 분무기에 대해서 관찰한 흐름 형태와 비슷함을 확인하였다. 이들은 Fig. 10과 같이

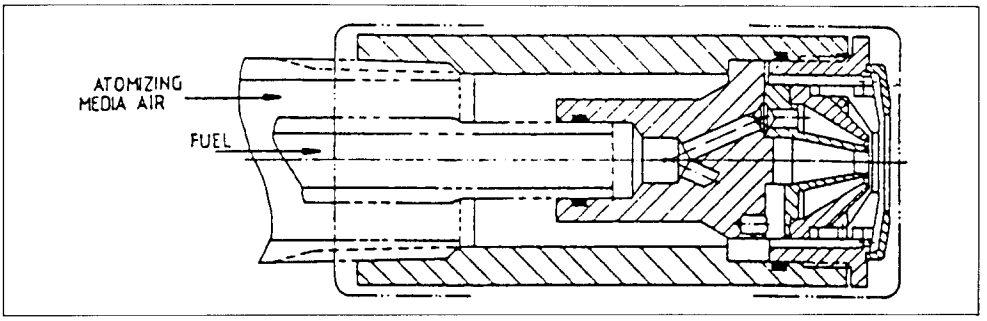

Fig. 9. External mixing type atomizer[38] (Parker Hannifin Corp.).

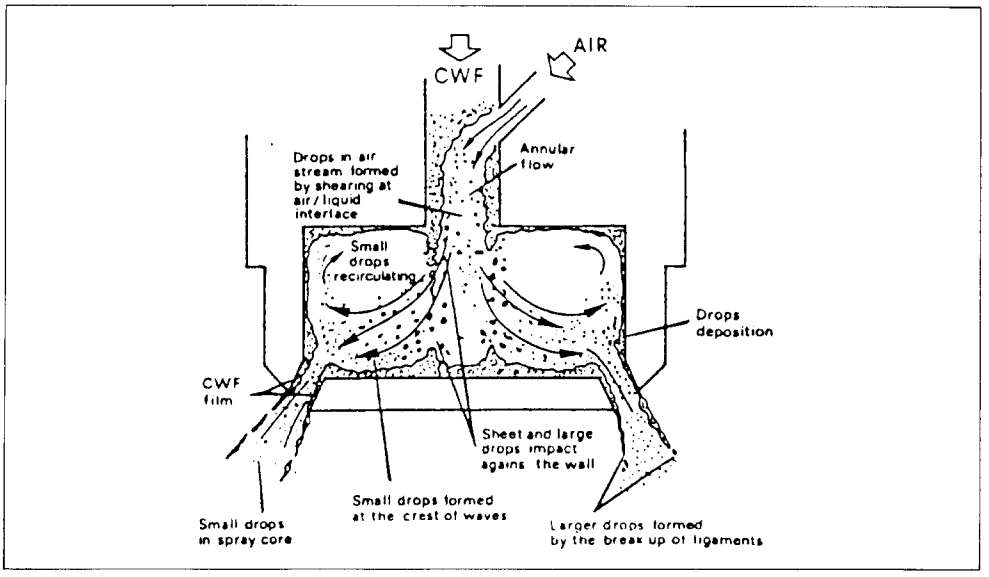

Fig. 10. Schematic diagram of the flow structure inside the nozzle[41].

Y-duct에서의 CWM-공기 흐름이 액체의 일부는 벽면을 따라 필름형태로 흐르고 나머지는 기체에 의해 액적 상태로 이동하는 annular flow와 매우 유사한 것을 관측하였고, Y-jet internal mixing 형식의 분무기에서 CWM 연료의 분무과정을 3가지로 구분하여 설명하였다.

그림을 살펴보면 mixing chamber에서는 Y-duct의 출구에서부터 높은 밀도의 core가 형성되며, Y-duct에서 나오는 큰 액적과 액사(ligament)들은 mixing chamber의 반대편 벽에 부딪혀서 두꺼운 필름을 형성하는 반면 작은 액적들은 공기에 의해 대부분 곧바로 exit hole로 이동되는 것을 알 수 있다. 한편 mixing chamber의 안쪽 벽에 형성된 CWM 필름은 고속의 공기 흐름에 의해 노즐에서 거의 대부분이 분사되며 일부분만이 연속적인 액체층으로 분출된다.

Sato 등[40]은 높은 전단응력(shear stress)이 존재할 때 분무기의 exitport에서 CWM연료가 분열되어 액적이 생성되는 과정을 Fig. 11에 보인 것과 같이 크게 연료-분무용 공기의 난류 계면과, 분무기 출구의 모서리로 구분하여 설명하였다. 전자의 경우는 개개의 석탄 입자가 연료의 표면으로부터 분리되며 후자의 경우에서는 합체 현상에 의해 연료 중의 최대 입자보다 훨씬 큰 구 모양의 액적이 생성된다.

따라서 위에서 설명된 모델을 근거로 내부혼합식 분무기에서는 출구 노즐의 안쪽 모서리에서 분무현상이 발생하고 다시 vena-contracta에서의 가속에 의해 재분무가 일어나고, 중간혼합식(Y-jet type) 분무기에서는 출구의 안쪽 벽에 형성된 액체 필름이 모서리에서 분열되어 액적이 형성된다고 추정함으로써 두 분무기에서 분사된 액적 크기의 차이를 설명할 수 있었다.

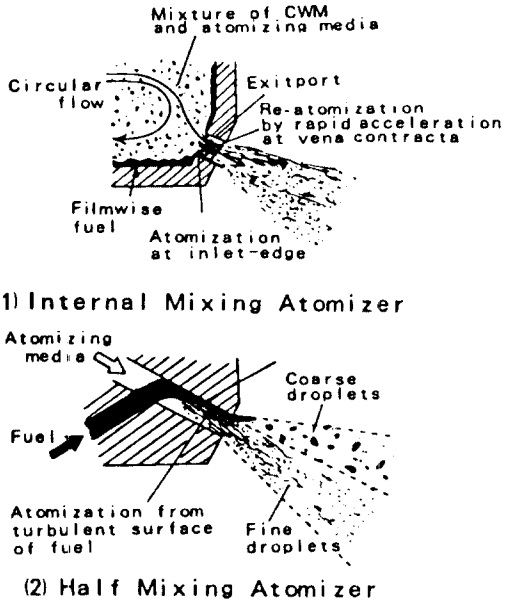

Fig. 11. Illustration of atomization at exitport of atomizers[43].

Thambimuthu 등[44]은 균일한 액체와 CWM연료의 분무 매카니즘에 대한 여러 문헌들을 분석하고 5가지 형태의 분무기를 테스트한 결과, CWM의 전체적인 분무 과정은 입자-액체 계면에서의 상 분리(phase separation)에 의한 instability에 의해 좌우되고, 분무 효율은 aerodynamically induced wave disturbance의 크기, 계면장력, 석탄의 입도분포 등에 의해서 결정된다고 주장하였다.

이들에 의하면 CWM 표면에 wave disturbance가 생기면 우선 큰 입자들과 미세한 석탄입자 사이의 액체층(나중에 큰 액적을 형성하게 됨)이 분리되고, aerodynamic energy가 증가하여 액체 표면에서의 wave disturbance 크기가 석탄입자의 직경과 비슷해져서 미세 입자들이 다시 2차로 분리되는 일련의 단계를 거쳐 분무 과정이 진행된다. 또한 이들은 CWM용 2유체 분무기에서 액적의 평균직경에 대한 관계식은 Weber number와 공기-액체비에 의해 표시될 수 있고, 분무성능은 일차적으로 연료-공기의 혼합 형태(mixing geometry)에 의해 결정된다고 추정하였다.

Inamura 등[45]은 CWM과 물, 글리세린이 외부혼합식 분무기에서 분사되는 과정을 추적하여 CWM연료의 분무가 액사 표면에서의 coal separation-wise mechanism과 unstable jet disintegration mechanism의 2 가지 매카니즘에 의해 진행된다는 모델을 제시하였다. 이 모델에 의하면 물의 농도가 낮은 불규칙한 형태의 액적은 주로 앞의 매카니즘에 의해서, 그리고 석탄의 농도가 비교적 낮은 구 형태의 액적은 주로 후자의 매카니즘에 의해 생성된다.

또한 분무용 공기의 속도가 증가하여 공기의 높은 전단응력에 의해 합체 구조가 깨지게 되면 CWM의 점도가 급격히 감소하므로 공기속도가 높아지면 불규칙한 모양의 미세한 액적들이 많이 생성되고, 액적의 입경분포도 감소하여 연료 중의 석탄 입자들의 입도분포와 비슷해지는 것을 밝혀냈다.

4-2. CWM - 공기의 2상 흐름

분무기 내부에서 발생하는 CWM과 공기의 2상 흐름(two-phase flow)에 대한 특성을 파악하고 해석하는 일은 분무성능의 향상과 분무기의 설계에 매우 중요한 사항이나 이 분야에 대한 데이타는 매우 드물다.

Graziadio 등[41]은 exit hole에서 임계흐름(critical flow) 현상이 존재한다는 가정 하에 분무기 내부의 Y-duct와 mixing chamber에서 측정된 압력 등을 분석하여 내부혼합식 분무기에서 CWM - 공기의 2상 흐름이 다음의 관계식으로 표현될 수 있음을 확인하였다.

$$G_A = \frac{1}{(1+A_1\Gamma)^m}\left[\frac{\gamma W_A}{RT_M}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}\right]^{1/2}(P_M-\varepsilon V_c G_L) \quad (1)$$

Shin과 Roh[46]는 T-jet internal mixing 형식의 분무기에서 CWM연료를 분무시킬 때 일정한 압력 이상에서는 각 출구 노즐에서 임계흐름 현상이 나타나는 것을 실험적으로 확인하고, 액체의 흐름이 기체의 유로를 차단하는 효과를 주는 것으로 가정하여 유도된 liquid-blockage effect model을 이용하여 노즐 출구에서의 CWM - 공기 흐름을 설명하였다.

CWM연료의 공급량이 일정할 때 mixing chamber 내부의 압력, P_M에 대한 공기 유량의 변화를 측정한 결과 임계흐름이 일어날 수 있는 압력, P*는 다음의 식으로 표시될 수 있었으며,

$$\frac{P^*}{P_M - P'} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2)$$

액상과 기상 간에는 상미끄럼(phase slip) 현상이 심하게 발생함을 확인하고, 다음의 경험식으로 표현되는 상미끄럼율이 CWM연료에도 적용될 수 있다고 보고하였다.

$$Y = 3.47\times10^{0}\cdot N_{Re}^{-0.77}\cdot(d_N/d_M)^{1.23}\cdot(t/d_N+5.77)\cdot(\mu_A/\mu_L)^{0.63} \quad (3)$$

4-3. CWM 액적 및 액적 내부에 존재하는 석탄의 입도 분포

CWM 액적과 액적 내부에 존재하는 석탄 입자의 크기 및 크기분포에 대하여는 다양한 측정기술을 이용하여 얻어진 실험결과들이 비교적 많이 보고되었다.

Sato 등[21,43]은 immersion liquid method를 이용하여 분무 용량이 80 Kg/Hr인 T-jet internal mixing 형식 및 Y-jet mixing 형식의 분무기에 대한 분사 실험을 통하여 실리콘 오일에 분산된 액적의 입도 분포와 액적 중의 석탄 입자 크기를 측정하고 이를 CWM연료와 비교하여 다음의 결과를 발표하였다.

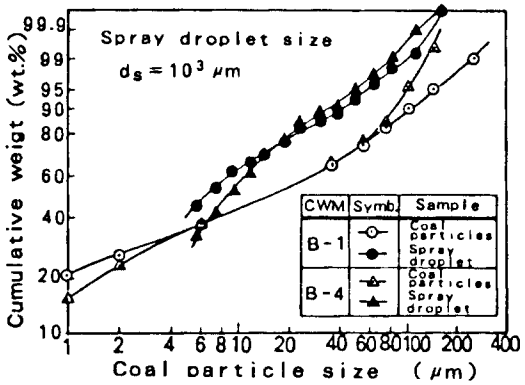

Fig. 12. Coal size distribution in a single spray droplet.[21]

1) CWM 중의 석탄입자 크기가 작을수록 분무된 액적의 크기가 감소한다.

2) 액적 중의 석탄입자의 입도분포는 CWM의 석탄 입도분포와 무관하다.

3) 액적의 직경에 따른 액적 중의 최대 입자크기의 변화는 거의 없다.

4) 액적 중의 최대 입자크기는 CWM연료 중의 최대 입자크기보다 작게 나타나므로 큰 액적들은 주로 미세한 석탄입자들의 합체 현상에 의해서 생성된다고 할 수 있다.

Fig. 12는 CWM 액적 중에 존재하는 석탄 입자의 입도분포를 나타낸 것으로 위에서 언급한 2)의 결과를 확인해 주고 있다.

Fig. 13은 구멍이 1개인 내부혼합식 분무기에서 측정된 CWM 액적의 부피분포와 CWM 중에 포함된 석탄 입자의 입도분포를 비교한 것이다[47]. 석탄 입자의 크기는 aperture의 직경이 100 μm인 Coulter Counter와 wet sieving 방법으로 측정되었고 액적의 크기분포는 laser diffraction 방법을 이용하는 Malvern droplet size analyzer를 사용하였다.

그림을 보면 공기/연료비가 증가할수록 액적의 크기는 점차 감소하며, 또한 액적의 직경이 슬러리 중에 포함된 석탄 입자들의 직경보다 훨씬 큰 것을 알 수 있는데 이는 곧 CWM 액적들이 대부분 여러개의 석탄 입자들과 물로 구성되어 있다는 사실을 뒷받침해주는

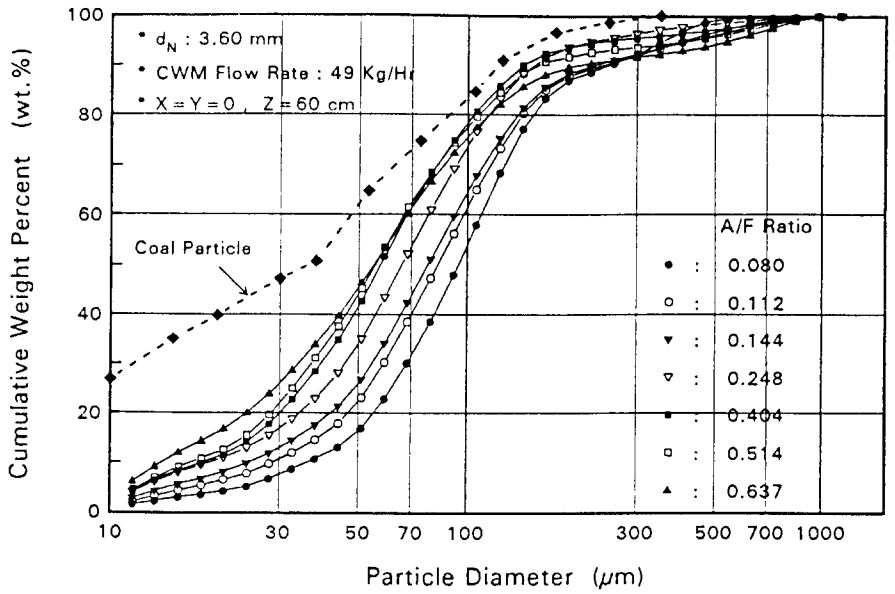

Fig. 13. Comparison of cumulative volume distribution of CWM spray with coal particles in CWM.[47]

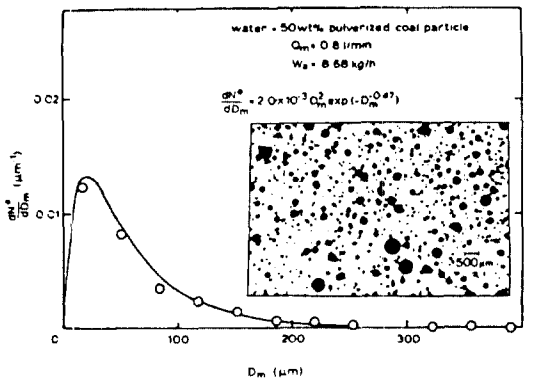

Fig. 14. Distribution of drop sizes of a pulverized coal/water suspension(CWS)[48].

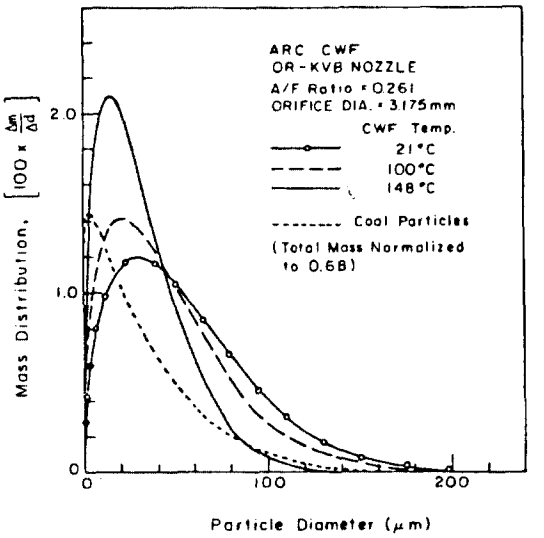

Fig. 15. Comparison of mass distribution on CWF sprays and coal particles at various CWF temperatures[51].

것이다.

Sakai 등[48]은 내부혼합식 분무기에서 CWM과 COM을 비롯한 4 종류의 서스펜션을 분사시킨 측정 결과와 Carmi와. Zjadel[49] 및 Petela와. Ghassemzadeh[50]의 모델을 검토하여 액체만을 분사시켜서 얻어진 데이타로부터 서스펜션 액적의 평균입경과 입경분포를 계산할 수 있는 모델을 제안하고 이를 실험적으로 증명한 바 있다.

이들은 분무된 서스펜션 액적 속의 입자 농도가 액적의 크기에 관계없이 서스펜션의 입자 농도와 같고, 서스펜션 액적의 부피는 액체만으로 구성된 액적의 부피에서 함유된 고체 입자의 부피만큼 증가한다는 가정을 도입하여 액체의 부피분율, α를 알 때 1개 액적의 크기와 입경분포를 각각 계산할 수 있는 다음의 관계식을 제안하였다.

$$D_m = a^{1/3} D_L \tag{4}$$

$$\frac{dN_m^*}{dD_m} = a\alpha D_m^2 \exp(-b\alpha^{1/3} D_m^c) \text{ (for N-K Distribution)} \tag{5}$$

Fig. 14는 immersion liquid method를 이용하여 얻어진 액적의 형태와 입도분포를 동시에 나타낸 것으로 normal distribution이 아닌 log-normal distribution 형태의 분포함수가 액적의 입도분포를 표시하는 데 적합함을 볼 수 있다.

4-4. Flash Atomization of CWM

연료의 액적과 fly ash의 입도분포를 미세하게 유지하기 위한 방안의 하나로 연료를 높은 압력에서 가열한 후 대기로 분사시키는 flash-atomization의 개념은 CWM연료에도 적용될 수 있으며, 실제로 flash-atomization을 CWM에 도입하여 그 효과를 확인하고 분무 특성에 미치는 영향을 실험한 결과가 몇가지 보고되었다.

Kang[51]은 flash-atomization에 대한 모델을 기초로 하여 flash-atomization의 진행 과정, bubble의 성장속도, 과열 효과, 분무각 변화 등을 설명하고 실험을 통해서 이를 입증하였다. 또한 Kang은 CWM연료의 내부에 존재하는 석탄 입자들 사이에서 일어나는 flash-atomization 현상을 온도 상승에 따라 석탄 입자들의 미세 기공에서 생성된 bubble들이 성장하여 입자 사이의 액체상을 분리시킴으로써 물 액적과 한 개의 석탄 입자로 구성된 새로운 액적들을 형성하는 일련의 과정으로 해석하였다.

Fig. 15는 CWM의 온도를 148°C로 가열하면 flash-atomization 현상에 의해서 100°C로 가열할 때에 비해 약 20wt.% 정도의 액적이 미세해지는 효과가 있다는 실험결과를 보여주고 있다.

Inamura 등[52]은 flash-boiling atomization을 CWM연료의 분무에 도입하기 위해서 plain-jet 형식의 분무기를 이용하여 노즐의 직경, 액체의 온도, 분사 압력, 연료의 석탄 농도 등이 분열 현상과 분무 특성에 미치는 영향을 실험하고 구멍이 12개인 T-jet internal mixing 형식의 분무기에 이를 적용하여 그 효과를 확인한 바 있다. Fig. 16은 슬러리 온도에 따른 액적의 입도분포를 나타낸 것으로 분무 축에서보다 액적군의 경계면에서 온도 상승에 따른 액적 크기의 감소 현상이 두드러짐을 보여준다.

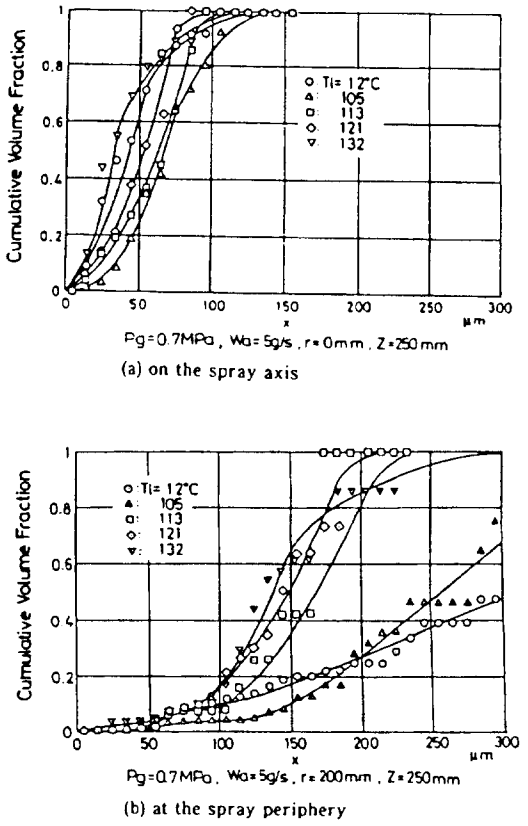

Fig. 16. Effect of CWM temperature on drop size distribution[52].

4-5. 연소 단계별 액적 크기의 변화

연소가 진행되는 각 단계별로 CWM 액적의 거동과 액적크기의 변화를 연구한 사례는 극히 드물며 Holve와 Meyer[53]가 온도와 산소농도가 균일한 소규모의 laminar flow reactor에서, in situ particle counter - sizer - velocimeter(PCSV)를 이용하여 연소 초기단계에서의 CWM 액적의 크기 변화를 최초로 측정한 바 있다. 이들은 분무액적이 4가지 형태로 구분될 수 있음을 보이고, cold condition(온도 : 300 K)과 연소 초기조건(온도 : 1700 K, 체류시간 : 1.4~34 msec)에서의 액적 크기분포 측정을 통하여 다음과 같은 몇가지 결과들을 제시하였다.

1) 액적의 크기분포 형태는 간단한 분포함수가 아니고 0.3~120μm 범위에서 몇개의 peak를 나타내고 있다.

2) submicron 범위에서는 액적들의 number density가 $10^6/cm^3$ 정도로 높으며, 이 범위의 입자들은 점화와 화염 안정성에 매우 중요한 역할을 한다.

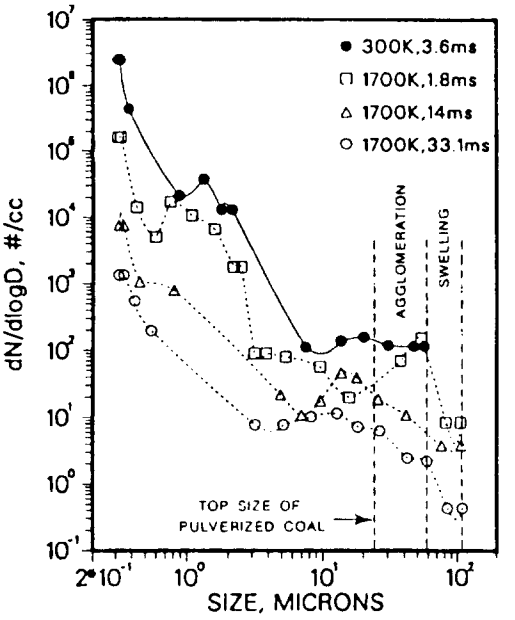

Fig. 17. Logarithmic number frequency distributions at five residence times in flow reactor for slurry # 4[53].

3) 입자의 팽윤(swelling) 현상이 모든 종류의 슬러리에서 발생되고 특히 회분함량이 적은 석탄일수록 심하게 나타난다.

4) 석탄입자 자체의 크기보다는 분무과정에서의 입자간 합체현상이 액적의 최대크기를 결정하는데 더 중요한 역할을 한다.

5) particle fragmentation은 대부분의 슬러리에서 발견되지 않았고, burnout rate를 높이기 위해서는 석탄의 미세한 분쇄보다는 분무기 성능의 향상이 더욱 중요하다.

Fig. 17은 연소 조건(1700K)과 cold condition(300K)에서의 number frequency distribution을 나타낸 것으로 체류시간이 증가함에 따라 입자들의 연소에 의해서 number density가 균일하게 감소하며 입자들의 팽윤현상에 의해 연소조건에서 60 μm 이상의 입자들이 나타남을 보여주고 있다. 이 그림은 석탄입자의 최대크기가 20 μm 정도인 CWM의 경우를 보인 것으로서 분무과정에서 입자들이 합체되어 20 μm보다 훨씬 큰 액적이 생성되고 연소과정에서 액적들이 다시 분열되지 않고 그대로 유지되고 있음을 확인해주고 있다.

5. 분무성능에 영향을 미치는 인자

일반적으로 분무성능은 분무기의 구조 및 형태, 운전

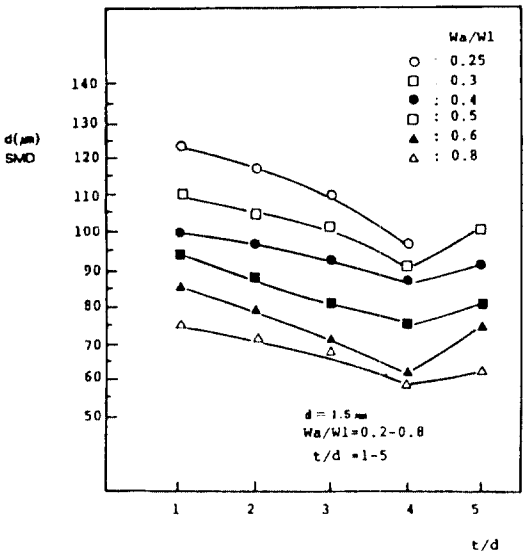

Fig. 18. Variations of CWM droplet sizes with the thi ckness/diameter ratio of nozzle[54].

조건, 연속상(continuous phase), 즉 액적이 분사되는 gaseous medium과 분산상(dispersed phase), 즉 액체의 물성 등과 같은 여러가지 인자의 영향을 받는다. 그러나 대부분 2유체 분무기가 사용되고 보일러나 연소로의 원료로 공급되는 CWM의 경우에는 공기/연료비, 공기 및 연료의 공급량 등과 같은 운전 조건과 점도, 표면장력 등의 연료 물성이 다른 항목에 비하여 상대적으로 더 중요한 인자가 된다.

5-1. 분무기의 구조 및 형태

일반적인 액체연료와 마찬가지로 분무기의 구조와 형태는 CWM연료의 분무성능에 많은 영향을 끼치며, 구체적으로 discharge orifice의 직경 및 두께, 연료 및 공기 통로의 직경, mixing chamber의 직경, 연료와 공기의 mixing length, 연료 통로와 mixing chamber의 각도 등을 열거할 수 있다.

Fig. 18은 Che 등[54]이 노즐이 1개인 내부혼합식 분무기를 이용하여 출구 노즐의 두께/직경비에 따른 CWM 액적의 평균입경 변화를 측정한 결과를 보인 것으로서 두께/직경비가 4 정도일 때 액적의 크기가 최소값을 나타내고 있다.

5-2. 운전 조건

분무성능에 영향을 미치는 운전조건으로 연료 및 공기의 공급량, 공기/연료비, 연료 및 공기의 공급 압력, mixing chamber의 압력 등을 열거할 수 있으나 이 중에서 공기/연료비가 가장 중요한 역할을 한다. 특히 연료의 특성상 반드시 2유체 분무기를 사용해야 하는 CWM연료의 경우는 일반적인 오일 연료에 비해 상대적으로 분무용 공기나 스팀의 공급량이 많아야 하고, 일정한 분무 조건에서도 연료의 물성에 따라 액적 크기의 차이가 심하게 나타나기 때문에 분무기의 성능을 규정하는 데 있어서 공기/연료비는 빼놓을 수 없는 중요한 항목이다.

Fig. 19는 석탄 농도가 60.0wt.%인 CWM연료를 직경이 3.60mm인 내부혼합식 분무기를 통해 분사시켰을 때 액체의 공급량을 매개변수로 하여 공기/연료비에 따른 분무 액적의 SMD를 표시한 것이다[47]. 물을 분사시킨 경우와는 달리 CWM의 유량변화에 관계없이 공기/연료비에 대한 액적 크기의 변화값이 거의 동일한 곡선 상에 놓이고 공기/연료비가 0.4 이상인 범위에서는 액적의 크기가 거의 일정해 짐을 볼 수 있다.

Fig. 20은 SMD와 $1+(M_l/M_a)$의 관계를 보인 것으로 CWM의 유량에 관계없이 모든 측정값을 기울기가 0.4836인 직선으로 표시할 수 있음을 나타낸다[47]. 이와 같이 내부혼합식 분무기에서 $1+(M_l/M_a)$ 항이 CWM 액적의 평균크기를 결정하는데 중요한 Parameter라는 사실은 Cromin 등[50], Thambimuthu 등[56], Kang 등[57], Tsai와 Knell[58], Smith 등[59]에 의해서 확인된 바 있으며, 그림에 나타난 수치는 Pohl 등[60]이 제시한 0.5에 근접한 수치이다.

5-3. 연속상의 물리적 성질

일반적으로 분무성능은 분사되는 주위의 가스 밀도, 온도, 압력 등의 영향을 받으며 특히 압력식 분무기나 airblast 분무기의 경우에는 이러한 주위의 조건들에 따른 분무 특성의 차이가 심한 것으로 알려져 있다. 그러나 CWM연료는 주로 보일러나 연소로 등에서 사용되므로 연소실의 조건 변화가 심한 디젤엔진이나 가스터빈 등에 사용되는 분무기에 비해 위에서 언급한 주위 가스의 영향이 상대적으로 적다고 할 수 있다.

Fig. 21은 분사실의 압력에 따른 CWM 액적의 평균입경의 변화 경향을 실험한 Yu와 Beer[61]의 발표자료를 소개한 것으로서 분사실 압력이 증가할수록 일정한 공기/연료비에서 액적의 평균입경이 감소됨을 보여준다.

5-4. 분산상의 물리적 성질

대부분의 분무기는 분무 액체의 밀도, 점도, 표면장력에 따라 분무 및 흐름 특성이 크게 좌우된다. 이 중에서 밀도는 액체의 경우 큰 폭의 변화를 보이지 않기 때문에 분무에 미치는 영향이 상대적으로 적고,

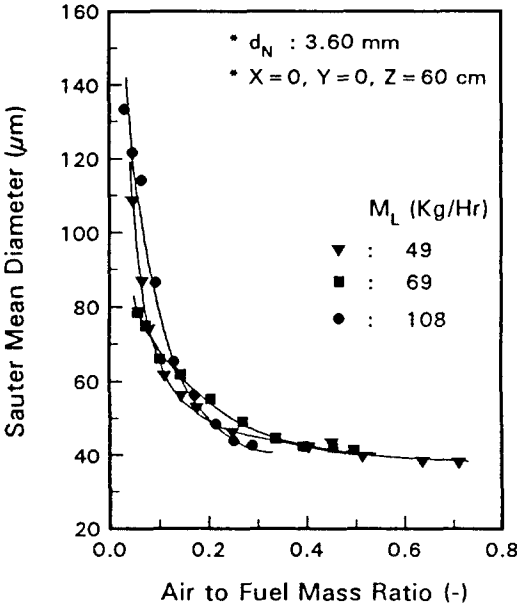

Fig. 19. Variations of CWM spray SMD with the air to fuel mass ratio at various liquid flow rates[47].

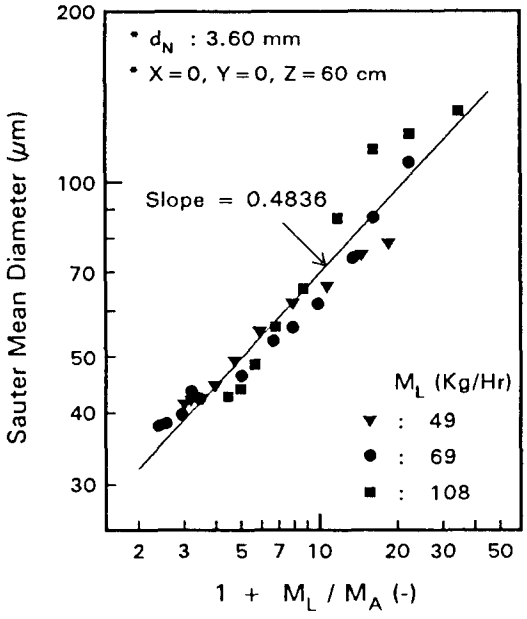

Fig. 20. CWM spray SMD versus $1+M_L/M_A$[47].

많은 경우에 있어서 액체의 점도가 가장 중요한 물리적 성질로 알려져 있다[22].

석탄 입자와 물의 2 상으로 구성된 CWM연료의 경우는 점도가 전단속도에 따라 틀려지는 비뉴톤 성질을 가지고 있을 뿐만 아니라 액상의 연료와는 달리 사용된

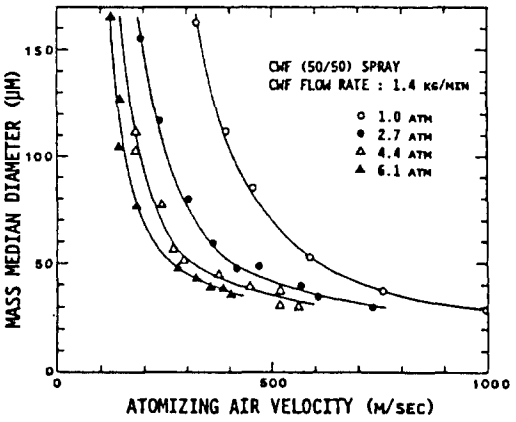

Fig. 21. Effects of atomizing air velocity and chamber pressure on mass median diameter of CWM sprays[61].

석탄의 종류, 석탄의 농도, 석탄의 입도 분포, 첨가제의 종류 및 농도, 온도 등의 여러가지 변수에 따라 점도의 차이가 심하게 나타나는 특징이 있다[2]. 따라서 CWM 연료의 물성에 대한 분무성능의 변화를 해석하기 위해서는 위에서 언급된 각 항목들의 상호 연관관계와 이들이 연료의 유변학적 특성(rheological characteristics)에 미치는 영향 등을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다.

2유체 분무기에서 CWM의 물성과 분무 특성과의 관계를 언급한 문헌들은 비교적 많은 편이며 대표적인 것들을 몇가지 살펴보면 우선 Tsai와 Vu[62], Sato 등[17]이 석탄 입자의 평균입경과 입도분포에 따른 분무 액적의 크기를 측정하였고, Pohl 등[60], Winters와 Vailey[63], Yu 등[64], Rakitsky 등[65], Stover 등[66], Kang[51] 등은 석탄의 농도와 넓은 범위의 전단속도에서 측정된 연료의 점도가 액적의 평균크기에 미치는 영향을 분석하였다.

이 밖에도 Krishna와 Sapienza[67], Sato 등[68], Nystr m[69] 등은 첨가제의 종류 및 농도에 따른 연료의 점도와 액적 크기의 변화를, Daley 등[70], Inamura 등[52], Olen[7] 등은 연료의 가열에 의한 영향을, 그리고 Manfred 등[71], Smith와 Williams[72] 등은 분무용 공기의 온도에 의한 영향을 각각 실험하여 그 결과를 발표한 바 있다.

Fig. 22는 high shear viscosity가 분무액적의 평균직경에 미치는 영향을 실험한 Kang[51]의 결과를 보인 것이다. Haake 점도계를 사용하여 10^3 sec^{-1} 이하의 전단속도에서 점도를 측정했을 때 3 종류의 연료 중에서 가장 낮은 값을 나타낸 연료(D-U-fine)가 10^4 sec^{-1} 이상의 전단속도에서는 중간값을 보이고 있으며, 공기/연료비에 따른 분무액적의 평균입경은 10^4 sec^{-1} 이상의 전단속도에서 측정된 점도에 따라 크기 순서가 정해

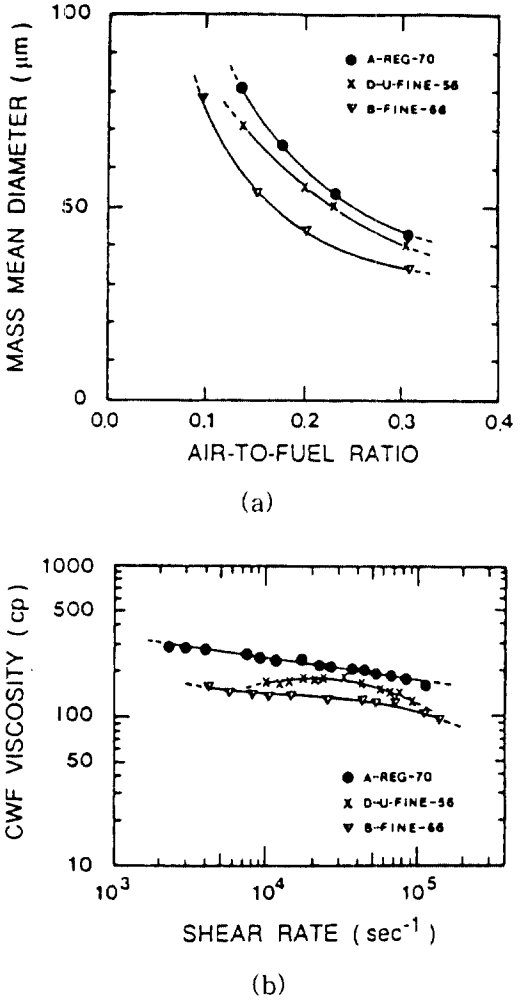

Fig. 22. Effect of coal particle size distribution on MMD and viscosity of CWFs (A-Reg, B-Fine, & D-U-Fine)[51].
(a) MMD versus AFR
(b) CWF viscosity versus shear rate

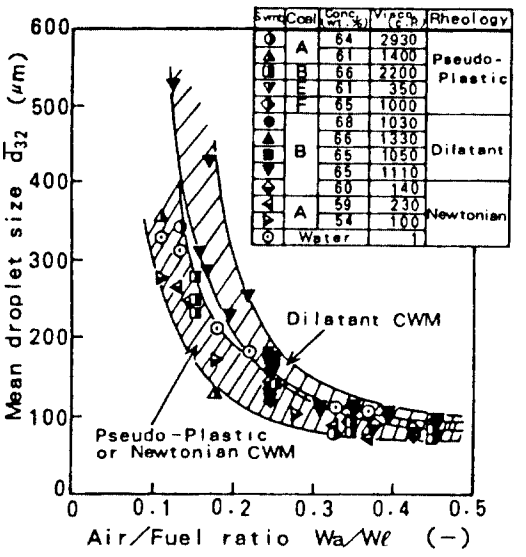

Fig. 23. Mean droplet size of CWM spray[43].

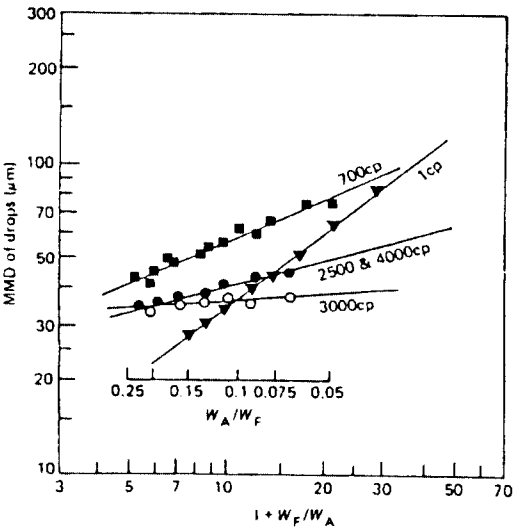

Fig. 24. Effect of fuel-to-air mass ratio (W_f/W_a) on droplet MMD from atomizer Mod 2.[62] ■, Unimodal utility grind CWM; ○, ●, unimodal micronized CWM; ▼, water

짐을 나타내고 있다.

Fig. 23은 T-jet internal mixing 형식의 분무기에서 CWM의 비뉴톤 성질에 따른 분무 액적의 크기를 보인 것으로서[43] pseudoplastic이나 Newtonian의 성질을 보이는 CWM의 경우는 SMD가 석탄 종류, 석탄 농도, 겉보기 점도 등과 무관하고 공기/연료비가 0.2 이상인 범위에서는 물 액적의 크기보다 CWM 액적의 크기가 작아짐을 보여 준다. Dilatant의 경우에는 점도가 pseudoplastic보다 더 낮지만 CWM 액적의 평균입경이 상대적으로 더 커지며, 비뉴톤 성질에 따른 평균입경의 차이가 공기/연료비가 증가할수록 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 24는 MMD가 32 μm와 19 μm인 석탄으로 제조된 연료의 분무 액적 크기를 공기/연료비에 따라 나타낸 것으로서[62] 점도가 3000cp인 연료에 비해 점도가 700cp인 연료의 경우가 액적의 크기가 훨씬 큰 것을 볼 수 있으며, 이는 석탄의 입도 분포가 액적 크기에 미치는 영향을 단순히 점도의 변화로만 설명할 수는 없다는 사실을 나타내는 한가지 예이다.

Table 1. CWM Droplet size correlations in twin-fluid atomizers.

Authors [Ref.]	Atomizer Type	Droplet Size Correlations
Hedley et al. [78]	External Mixing (plain-jet type)	$SMD = 8200P^{-0.934}$
Pohl et al. [60, 79]	Y-Jet (1 exit hole)	$MMD = \dfrac{Bv_l^{0.5}M_L^{0.1}\left(1+\dfrac{M_L}{M_A}\right)^{0.5}h^{0.1}\sigma^{0.2}}{\rho^{0.3}M_L/d_a^2}$
De Michele et al. [76, 80]	Y-Jet internal (8 exit holes)	$MMD = 1.82\,d_0\left(\dfrac{\rho_a V_D^2 d_0}{\sigma}\right)^{-0.57}$
Meyer et al. [38, 39]	External Mixing (Paker-Hannifin Atomizer)	$SMD = \beta_0 + \beta_1\left(1+\dfrac{M_L}{M_A}\right)$
Garbett et al. [81]	External Mixing (plain-jet type)	$SMD = \dfrac{A}{(\rho_a V_R^2)^a} + B\left(\dfrac{M_A}{M_L}\right)^{-\beta}$
Thambimuthu et al. [44, 56]	External Mixing (plain-jet atomizer with an unswirled air flow)	$SMD = 0.058\,D_0\left(\dfrac{\rho_a V_a^2 D_0}{\sigma}\right)^{0.26}\left(1+\dfrac{M_L}{M_A}\right)^{0.66}$: Sub-sonic Regime $SMD = 13.46\,D_0\left(\dfrac{\rho_a V_a^2 D_0}{\sigma}\right)^{-0.77}$: Sonic Regime
	Y-Jet	$SMD = 30.57\,D_0\left(\dfrac{\rho_a V_a^2 D_0}{\sigma}\right)^{0.78}$
Kang et al. [51, 57, 58]	Y-Jet (1 exit hole)	$MMD = 0.0263\,d_0\left(\dfrac{\sigma}{\rho_a V_R^2 d_0}\right)^{0.25}\left(1+\dfrac{1}{M_A/M_L}\right)^{0.5} + 0.0050\,d_0\left(\dfrac{(K\dot{\gamma}^{n-1})^2}{\rho_l \sigma d_0}\right)^{0.5}\left(1+\dfrac{1}{M_A/M_L}\right)^{0.75}$
Andreussi et al. [76, 82]	Y-Jet Internal (8 exit holes)	$\left[\left(\dfrac{D_{V,0}}{D_c}\right)^3 - \left(\dfrac{1}{2}\dfrac{D_{V,F}}{D_c}\right)^3\right]^{1/3} = \alpha'\left(\dfrac{\rho_a V_a^2 D_c}{\sigma}\right)^{-0.6}$
Huang et al. [83]	Air-Blast (used in CWS gas turbine combustor)	$SMD = \sum_{j=1}^{M} N_j d_j^3 \Big/ \sum_{j=1}^{M} N_j d_j^2$ $N_j = \dfrac{100W_j}{d_j^3 \cdot \sum_{j=1}^{M}(W_j/d_j^3)}$, $W_i = \dfrac{100\sum_{j=1}^{N} M_i W_{ij}}{\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} M_i W_{ij}}$
Smith et al. [59, 72]	Air-Blast (plain-jet type)	$SMD = 2.12\times 10^6 \dfrac{\left(1+\dfrac{1}{M_A/M_L}\right)^{0.3}}{V_R^2 \rho_a^{0.5}} + 1.08\times 10^2 \dfrac{\left(K\left(4\dfrac{V_L}{d_0}\right)^{n-1}\right)^{2.9}}{V_L^{0.8}}\left(1+\dfrac{1}{M_A/M_L}\right)^{2.0}$
Ren et al. [77, 84]	Y-Jet Internal (DZ-type atomizer)	$SMD = 10500\left(\dfrac{\rho_a(V_L-V_A)^2 d_0}{\sigma}\right)^{0.25}\left(\dfrac{MO_L}{MO_A}\right)^{0.58} \cdot \nu_l^{0.56}\left(1+\dfrac{1}{M_A/M_L}\right)^{0.81}(1+\cos\gamma)^{0.34}$

6. CWM연료에 대한 액적 크기 관계식

연료의 물성, 분무 조건, 분무기의 종류 및 규격 등이 액적의 입경분포에 미치는 영향과 이들 사이의 상관관계에 대한 본격적인 연구와 이론적인 접근은 80년대 후반부터 시작되었기 때문에 이 분야에 대한 연구결과는 아직도 미진한 부분이 많은 상태이다. 대부분의 경우 2유체 분무기를 사용하는 CWM연료에 대하여 분무액적 입경 및 크기분포를 측정하고 평균입경에 대한 실험적인 관계식들을 유도한 연구사례를 몇가지 소개하면 아래와 같다.

Pohl 등[60]은 1개의 구멍을 가진 Y-jet type atomizer에서 농도가 60.0~66.5wt.% 범위인 CWM을 분사시키고 laser particle size analyzer를 이용하여 액적의 크기를 측정하였다. 이들은 측정된 데이타를 Knell 등[73]과 Gillberg 등[74]의 자료와 비교하여 아래에 나타낸 바와 같이 Wigg의 관계식[75]에서 점도와 기-액 비에 대한 지수값을 변화시킴으로써 액적의 MMD를 계산할 수 있음을 보고하였다.

$$MMD = \frac{B\,\nu_L^{0.5} M_L^{0.1}\left(1+\frac{M_L}{M_A}\right)^{0.5} d_M^{0.1}\,\sigma_L^{0.2}}{\rho_A^{0.3}\, M_L / d_A^2} \quad (6)$$

Thambimuthu 등[44,56]은 외부혼합식과 Y-jet 형태의 분무기를 포함한 5 종류의 분무기를 테스트한 결과 CWM 분무기는 음속영역에서는 Weber number에 의해서 성능이 좌우되며, 아음속 영역에서는 추가로 기-액 비의 영향을 받게 된다는 것을 알아내고, 분무기 종류별로 평균입경에 대한 계산식들을 제안한 바 있다.

Kang[31]은 직경이 3.175mm인 1 개의 구멍을 가진 Y-jet 형식의 분무기를 이용하여 공기/연료비가 0.1~0.3 범위일 때의 액적 직경을 laser diffraction spray analyzer로 측정하였다. 측정된 평균입경은 다음과 같이 aerodynamic force와 surface tension force의 비로 정의되는 Weber number와, Reynolds number에 대한 Weber number의 제곱근의 비로 표시되는 Z number가 포함된 두 개의 항으로 구성된 수식으로 나타낼 수 있다고 보고하였다.

$$MMD = 0.0263\, d_L \left(\frac{\sigma_L}{\rho_A V_R^2 d_L}\right)^{0.25} \left(1+\frac{1}{M_A/M_L}\right)^{0.5} \quad (7)$$

$$+ 0.0050\, d_L \left(\frac{(K\gamma^{n-1})^2}{\rho_L\,\sigma_L\,d_L}\right)^{0.5} \left(1+\frac{1}{M_A/M_L}\right)^{0.75}$$

또한 이들은 근사식을 통하여 분무실험에 사용된 분무기에서 발생되는 전단속도가 $2\times10^1-6\times10^4 sec^{-1}$ 범위인 것을 계산하였고, 이러한 높은 전단속도에서의 점도를 capillary tube viscometer로 측정하여 그 값을 위의 식에 대입하여 분석한 결과 액적크기에 대한 관계식에서는 CWM의 정확한 점도값을 정의해 주는 것이 중요함을 입증하였다.

Andreussi 등[76]은 8 개의 구멍을 가진 Y-jet internal mixing type atomizer에서 6가지 종류의 CWM연료를 분무시켜서 laser light diffraction method와 high-speed photographic method를 이용하여 분무기의 축 방향과 반경 방향에 따른 액적의 크기 및 농도와 속도를 측정하고, 아래와 같은 관계식을 제안하였다.

$$\left[\left(\frac{D_{V,0}}{D_c}\right)^3-\left(\frac{1}{2}\,\frac{D_{V,F}}{D_c}\right)^3\right]^{1/3}=\alpha'\left(\frac{\rho_A V_A^2 D_c}{\sigma_L}\right)^{-0.6} \quad (8)$$

여기서 $D_{V,0}$는 축 방향과 수직으로 측정된 액적의 MMD를, 그리고 $D_{V,F}$는 연료 중에 포함된 석탄입자의 MMD를 각각 나타내고, α'는 CWM의 물성에 따라 변하는 상관계수이다.

Ren 등[77]은 3 부분에서 단계적으로 분무용 압축공기를 공급하는 독특한 형식의 Y-Jet internal mixing type atomizer에서 각 단계별로 공기의 momentum에 따른 penetrating depth를 측정하고, Weber number, 공기/연료비, 점도 등이 분무기의 성능에 미치는 영향을 실험하여 다음의 실험식을 유도하였다.

$$SMD = 10{,}500\left(\frac{\rho_A|V_L-V_A|^2 d_N}{\sigma_L}\right)^{0.45}\left(\frac{M_L}{M_A}\right)^{0.58}$$

$$\cdot\,\nu_L^{0.56}\left(1+\frac{1}{M_A/M_L}\right)^{0.81}(1+\cos r)^{0.14} \quad (9)$$

Table 1은 위에서 소개한 경험식들과 함께 거의 대부분의 경우에 2유체 분무기를 이용하여 분무되는 CWM연료에 대하여 현재까지 보고된 액적크기 관계식들을 정리한 것이다.

7. 맺음말

본 내용에서는 CWM연료의 분무 특성을 이해하기 위하여 분무성능이 연소에 미치는 영향과 CWM용으로 개발된 분무기의 종류, CWM의 분무 매카니즘 등을 살펴보고, 분무성능에 영향을 미치는 인자들 간의 상호관계와 분무액적의 크기 및 분포에 대한 실험결과 등을 종합적으로 검토해 보았다.

CWM은 한 개의 석탄입자가 아닌 여러 개의 석탄입자와 물이 합체되어 형성된 액적으로 분사되므로 액적의 크기가 CWM의 화염 안정성과 연소효율을 결정하는데 일차적으로 중요한 역할을 하게 된다. 따라서

미세한 액적을 분사시킬 수 있는 성능이 우수한 CWM용 분무기를 개발하기 위해서는 CWM연료의 분무 특성과 여러가지 인자들 간의 상호작용 및 이들이 액적의 크기에 미치는 영향 등을 정량적으로 파악하는 것이 필수적이다. 특히 CWM연료의 경우는 CWM의 물리적 성질 및 분무조건과 액적의 입도분포 사이의 상호관계에 대한 이론적인 규명이나 실험자료가 다른 액체연료에 비해 상대적으로 부족하고 연구자들의 실험결과나 현상 해석들 사이에 서로 상충되는 부분이 많이 발견되므로 이 분야에 대한 좀 더 집중적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

사용기호

a : Normalizing coefficient [-]
A_1 : Constant [-]
b : Coefficient [$1/m^c$]
B : Constant [-]
c : Coefficient [-]
d : Diameter [m]
D : Diameter [m]
D_c : Characteristic dimension [m]
$D_{V,0}$: Mass median diameter [m]
$D_{V,F}$: Mass median diameter of solid [m]
$d_{p,m}$: Mass median diameter of coal particles in CWM [μm]
G : Mass velocity in the exit holes [$Kg/m^2 \cdot sec$]
K : Flow consistency index or power law coefficient [$Kg/m \cdot sec^{2-n}$]
m : exponent in eqn. (1) [-]
M : Mass flow rate [Kg/sec]
$\dot{M}$: Moment [Kg · sec/m]
N* : Normalized number [-]
N_{Re} : Reynolds number [-]
n : Flow behavior index or power law exponent [-]
P* : Critical pressure at the throat of nozzle [Pa]
P' : Pressure correction for the critical discharge from the mixing chamber [Pa]
P_M : Static pressure in the mixing chamber [Pa]
r : Lashing angle of the air flow [-]
R : Gas constant [$Kg \cdot m^2/K \cdot mol \cdot sec^2$]
t : Nozzle Thickness [m]
T_M : Absolute air temperature in the mixing chamber [K]
V_A : Air velocity [m/sec]
V_c : Velocity of sound in the gas phase [m/sec]
V_R : Relative velocity between liquid jet and atomizing air [m/sec]
W : Molecular weight [mol^{-1}]
Y : Phase slip ratio [-]

Greek letters

α : Liquid volume fraction [-]
α' : Constant in eqn. (8) [-]
γ : Ratio of specific heats at constant pressure and constant vlolume [-]
$\dot{\gamma}$: Shear rate [1/sec]
Γ : Dimensionless group [-]
ε : Coefficient in eqn. (1) [-]
μ : Viscosity [Kg/m ·sec]
ν : Kinematic viscosity [Kg/m sec]
ρ : Density [Kg/m^3]
σ : Surface tension [Kg/sec^2]

Subscripts

A : Air
L : Liquid or CWM fuel
m : Suspension
M : Mixing chamber
N : Nozzle

참고문헌

1. 김동찬 외: "CWM의 연소효율 증대를 위한 버너 및 분무기술 개발 연구 (IV)", 한국에너지기술연구소 연구보고서, KRC-90G-T20 (1991).
2. 지평삼 외: "석탄 물 혼합연료의 기술개발 연구", 한국전력공사 기술연구원 연구보고서, KRC-85G-J04 (1990).
3. Nakanishi, T.: "Present Status of CWM Demonstration Tests in Japan", Proc. of the 18th Int. Technical Conf. on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, Fla., April 26-29, pp. 95 - 105 (1993).
4. McHale, E. T.: "Review of CWF Combustion Technology", *Energy Progress*, **5**(1), 15 (1985).
5. Miller, B. G.: "Coal-water Slurry Fuel Utilization in Utility and Industrial Boilers", *Chem. Eng. Prog.*, **85**(3), 29 (1985).
6. Manski, J.: "Coal/Water Fuels", *Power*, **129**(7), 17 (1985).
7. Olen, K. R.: "Atomization and Combustion of Coal/Water Mixture Fuels", ASME Paper No. 84-JPGC-FU-D (1984).
8. Papachristodoulou, G. and Trass, O.: "Coal Slurry Fuel Technology", *Can. J. Chem. Eng.*, **65**, 177 (1987).
9. Holve, D. J., Fletcher, T. H. and Gomi, K.: "Com-

parative Combustion Studies of Ultrafine Coal/Water Slurries and Pulverized Coal", *Combust. Sci. and Tech*, **52**, 269 (1987).
10. Yao, S. C. and Liu, L.: "Behavior of Suspended Coal-Water Slurry Droplets in a Combustion Environment", *Combustion and Flame*, **51**, 335 (1983).
11. Kuroda, H., Masai, T., Takahashi, Y. and Watanabe, S.: "Combustion of Coal-Water Slurry in a Multiple-Burner Furnace", Proc. of the 5th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion and Technology, Tampa, Fla., April, 25-27, pp. 502 - 521 (1983).
12. Liu, G. E. and Law, C. K.: "Combustion of Coal-Water Slurry Droplets", Fuel, 65, 171 (1986).
13. Mattews, K. J. and Jones, A. R.: "The Effect of Coal Composition on Coal Water Slurry Combustion and Ash Deposition Characteristics", Proc. of the 8th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Fla., April 25-27, pp. 388 - 407 (1986).
14. Yu, T. U. and Beer, J. M.: "Atomization of Coal-Water Fuel at Elevated Pressure", Proc. of the 14th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April 24-27, pp. 191 - 202 (1989).
15. Srinivasachar, S., Kang, S. W., Timothy, L. D., Froelich, D., Sarofim, A. F. and Beer, J. M.: "Fundamentals of Coal-Water Fuel Combustion", Proc. of the 8th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Fla., April 25 -27, pp. 330~341 (1986).
16. Kaneko, S., Tokuda, K., Noda, M. and Maruta, T.: "Combustion Properties of CWM", Proc. of the 14th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April 24-27, pp. 221 - 233 (1989).
17. Sato, K., Shoji, K., Okiura, K., Akiyama, I. and Baba, A.: "Effect of Coal Particle and Spray Droplet Sizes on Combustion Characteristics of Coal-Water Mixtures", *Powder Technology*, **54**, 127 (1988).
18. Kang, S. W., Sarofim, A. F. and Beer, J. M..: "Agglomerate Formation During Coal Combustion: A Mechanistic Model", *Combustion and Flame*, **86**, 258 (1991).
19. Inamura, T., Nagai, N., Matsunaga, Y., Watanabe, T. and Nawata, K.: "Effective Twin -Fluid Atomization of Coal-Water Mixture Fuel by Applying Flash-Boiling", Proc. of the 4th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Sendai, Japan, August 22-24, pp. 65~72 (1988).
20. Eckhart, C. F., Farthing, G. A., Taylor, B. E. and Peet, W. J.: "Coal-Water Fuel Burner Development Work at Babcock & Wilcox", Technical Paper, RD-TPA 84-22, Babcock & Wilcox Co. (1984).
21. Sato, K., Okiura, K., Shoji, K., Akiyama, L. and Takahashi, Y.: "Experimental Study on the Atomization Process of Slurry Fuels", Proc. of the 4th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Sendai, Japan, August 22-24, pp. 73~80 (1988).
22. Lefebvre, A. H.: "Atomization and Sprays", Ch. 1, pp. 1 - 25, Hemisphere Publishing Corp., New York (1989).
23. Kim, D. C., Kang, S. K., Lee, J. K., Shin, D. H., Son, S. G., Kim, J. D. and Roh, N. S.: "Experimental Study on Atomization and Combustion of CWM Fuel", Proc. of the 3rd U.S.A.-Korea Joint Workshop on Coal Utilization Technology, Pittsburgh, Pa., October 5-7, pp. 138 - 148 (1986).
24. Marnicio, R. J. and Sommer, H. T.: "Coal/Water Slurry Rotating Cup Atomization", Proc. of the 5th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion and Technology, Tampa, Fla., April, 25-27, pp. 1182 - 1203 (1983).
25. Sommer, H. T., Marnicio, R. J., Thylander, L. and Landaeus, K.: "Burner Development for Slurry Fuel : The Rotary Cup Approach", Proc. of the 6th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion and Technology, Orlando, Fla., June 25-27, pp. 1052 - 1062 (1984).
26. Smouse, S. M., Brown, G. T., Bellas, G. T. and Joubert, J. I.: "Development of a Rotary-Cup Burner for Small-Scale CWM Applications", Proc. of the 13th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Denver, Colo., April 12-15, pp. 223 - 240 (1988).
27. Chigier, N. and Breault, R.: "Effect of Coal Type and Beneficiation Process on Atomization of Coal-Water Slurry Fuels", Proc. of the 16th Int. Conf. on Coal & Slurry Technologies, Clearwater, Fla., April 22-25, pp. 529 - 540 (1991).
28. Handerson, C. B., Scheffee, R. S. and McHale, E. T.: "Coal-Water Slurries--A Low-Cost Liquid Fuel for Boilers", *Energy Progress*, 3(2), 69 (1983).
29. Smouse, S. M. and Mcllvried, T. S.: "Evaluation of a Novel Opposed-Jet CWM Atomizer - Part 1: Summary of Completed Tests and Experimental Plans", Proc. of the 8th U.S.-Korea Joint Workshop on Coal Utilization Technology, Seoul, Korea, October 29-30, pp. VI-19 - VI-36 (1991).
30. Bourchier, J. C., Pourkashanian, M. and Williams, A.: "The Combustion and Atomization of Medium and Coarse Coal-Water Slurries", Proc. of the 3rd European Conf. on Coal Liquid Mixtures, Malm ,

Sweden, October 14-15, pp. 163 - 178 (1987).
31. Smith, C. F., Sojka, P. E. and Thames, J. M.: "The Influence of Fluid Physical Properties on Coal-Water Slurry Atomization", Trans. ASME : *J. Eng. for Gas Turbines and Power,* **112**, 15 (1990).
32. Ma, R., Wei, X., Pan, Z., Huang, Z., Yang, J., Zhang, P. and Wang, Y.: "A New Design of Low-Duty Coal Slurry Burner for the Application in Kilns", Proc. of the 15th Int. Conf. on Coal & Slurry Technologies, Clearwater, Fla., April 23-26, pp. 131 - 142 (1990).
33. Farthing, G. A., Daley, R. D., Vecci, S. J., Michaud, E. R. and Manfred, R.: "Properties and Performance Characteristics of Coal-Water Fuels", Technical Paper, RDTPA 83-11, Babcock & Wilcox Co. (1983).
34. Manfred, R. K. and Derbidge, T. C.: "Program of Coal-Water Slurry Development", *Energy Progress,* **4**(2), 85 (1984).
35. Perkins, R. P. and Manfred, R. K.: "Coal Slurry Development Program", *Chem. Eng. Prog.,* **81**(5) 69 (1985).
36. Manfred, R. K., Borio, R. W., Smith, D. A., Rini, M. J., LaFlesh, R. C. and Marion, J. L.: "Development of a Coal-Water Burner", ASME Paper No. 83-JPGC-Pwr-40 (1983).
37. Dubin, G. W., Durant, J. F., Knell, E. W., Rakitsky, W. G. and Lachowicz, Y. V.: "Atomization and Combustion Characteristics of OXCE Fuel Company Coal-Water Fuel", Proc. of the 1985 Spring National Meeting and Petro Expo '85, Houston, Tex., March 24-28, 33p. (1985).
38. Meyer, P. and Chigier, N.: "Droplet Measurements Using A Malvern 2200 Particle Sizer", *Atomization and Spray Technology,* **2**, 261 (1986).
39. Meyer, P. L. and Chigier, N.: "The Atomization Process in Coal-Water Slurry Sprays", Proc. of the 8th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Fla., April 25-27, pp. 144 - 161 (1986).
40. Meyer, P. L. and Chigier, N.: "Characterization of the Atomization Process in Coal-Water Slurry Sprays", Proc. of the 3rd Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Vol. 2, London, July 8-10, pp. IVB(b)/1/1 - 23 (1985).
41. Graziadio, M., Andreussi, P., Tognotti, L. and Zanelli, S.: "Atomization of Coal-Water Fuels by a Pneumatic Internal Mixing Nozzle : Part I - Two-phase Flow Inside the Nozzle", *Atomization and Spray Technology,* **3**, 187 (1987).
42. Mullinger, P. J. and Chigier, N.: "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers", *J. Inst. Fuel,* **47**, 251 (1974).
43. Sato, K., Okiura, K., Baba, A., Takahashi, Y. and Shoji, K.: "A Study on Spray Combustion of CWM", Proc. of the 8th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Fla., April 25-27, pp. 178 - 191 (1986).
44. Thambimuthu, K. V., Stover, N. S. H. and Whaley, H.: "The Mechanism of Atomization of Coal-Water Mixtures", Proc. of the 3rd European Conf. on Coal Liquid Mixtures, Malm , Sweden, October 14-15, pp. 133 - 149 (1987).
45. Inamura, T., Nagai, N. and Inagaki, H.: "A Study on the Twin-Fluid Atomization of a Highly Concentrated Coal-Water Mixture", *JSME Int. J.,* **30**(269) 1790 (1987).
46. 신대현, 노남선: "CWM 분무 노즐 개발 연구 기-액 혼합유체의 분출 특성", 과학기술처 연구보고서, KE-86(B)-12 (1986).
47. 노남선: "CWM연료의 분무 특성에 관한 연구", 연구 자료 (1993).
48. Sakai, T., Sadakata, M., Saito, M. and Okamura, M.: "Mean Diameters and Drop Size Distribution of Suspension Sprays", *Atomization and Spray Technology,* **1**, 147 (1985).
49. Carmi, S. and Ghassemzadeh, M. R.: "Viscosity and Spray Formation Studies of Coal-Oil Mixtures", *Fuel,* **60**, 529 (1981).
50. Petela, R. and Zajdel, A.: "Calculation of a Mean droplet diameter of an Atomized Mixture of Dust and Liquid", *Fuel,* **59**, 795 (1980).
51. Kang, S. W.: "Combustion and Atomization Studies of Coal-Water Fuel in a Laminar Flow Reactor and in a Pilot-Scale Furnace", Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass. (1988).
52. Inamura, T., Nagai, N. and Matsunaga, Y.: "A Study on Flash-Boiling Atomization of Highly Concentrated Coal-Water Mixture (1st Report, Disintegration Mechanisms and Atomizing Characteristics)", *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu,* **54**(504), 2199 (1988).
53. Holve, D. J. and Meyer, P. L.: "Coal/Water Slurries: Fuel Preparation Effects on atomization and Combustion", *Combust. Sci. and Tech.,* **52**, 243 (1987).
54. 채재우 외: "Coal-Water Slurry의 무화 특성에 관한 연구", 동력자원부 연구보고서, 89-2302-351FG (1990).
55. Cronin, L., Sojka, P. E. and Lefebvre, A. H.: "The Effect of Film Thickness on Coal Water Slurry

Atomization", Proc. of the Int. Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, Tulsa, Okla., October 21-24, 8 p. (1985).
56. Thambimuthu, K. V., Whaley, H. and Lee, G. K.: "Developments in atomization and Burner Design for Coal-Water Mixture Combustion", Proc. of the Int. Symp. on Multi-phase Flows, Hangzhou, China, August 3-5, 6p. (1987).
57. Kang, S. W., Yu, T. U. and Beer, J. M.: "The Significance of High Shear Viscosity for the Atomization of Coal-Water Fuel", Proc. of the Fossil Fuels Combustion Symp. 1989 : 12th Annual Energy-Sources Technology Conference and Exhibition, Houston, Tex., January 22-25, pp. 71 - 78 (1988).
58. Tsai, S. C. and Knell, E. W.: "Rheology and Its Effects on Atomization of Coal Water Slurry", Proc. of the 1st Annual Pittsburgh Coal Conf., Pittsburgh, Pa., September 17-21, pp. 190 - 200 (1984).
59. Smith, C. F., Sojka, P. E. and Thames, J. M.: "The Influence of Fluid Physical Properties on Coal-Water Slurry Atomization", Trans. ASME : *J. Eng. for Gas Turbines and Power,* **112**, 15 (1990).
60. Pohl, J. H., Sepulveda, J. and Rothfeld, L. B.: "Correlation of the Spray Characteristics of Coal-Water Fuels", Proc. of the 7th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, New Orleans, La., May 21-24, pp. 357 - 376 (1885).
61. Yu, T. U. and Beer, J. M.: "Atomization of Coal-Water Fuel at Elevated Pressure", Proc. of the 14th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April 24 - 27, pp. 191 - 202 (1989).
62. Tsai, S. C. and Vu, T.: "Atomization of Coal-Water Slurry Using Twin-Fluid Jet Atomizer", *Fuel,* **66**, 1596 (1987).
63. Winters, P. J. and Vailey, R. T.: "The Effect of Fuel Formulation on the Atomization Characteristics of Coal-Water Mixtures", Proc. of the 7th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, New Orleans, La., May 21-24, pp. 430 - 439 (1985).
64. Yu, T. U., Kang, S. W., Toqan, M. A., Walsh, P. M., Teare, J. D., Beer, J. M. and Sarofim, A. F.: "Disruptive Atomization and Combustion of CWF", Proc. of the 8th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Fla., April 25-27, pp. 162 - 175 (1986).
65. Rakitsky, W. G., Knell, E. W. and Murphy, T. J.: "Rheological Properties Significant for the Atomization of Coal-Water Fuels", Proc. of the 11th Int. Conf. on Slurry Technology, Hilton Head, S.C., March 16-18, pp. 137 - 143 (1986).
66. Stover, N. S. H., Thambimuthu, K. V. and Todd, A.: "The Effect of Dispersant and Stabilizer Type and Amount on the Rheological and Atomization Characteristics of Coal-Water Fuels", Proc. of the 15th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April 23-26, pp. 397 - 408 (1990).
67. Krishna, C. R. and Sapienza, R. S.: "A Study of the Effects of Additives on Coal-Water Mixture Atomization", Proc. of the 2nd European Conf. on Coal Liquid Mixtures, London, September 16-18, pp. 115 -128 (1985).
68. Sato, K., Okiura, K., Baba, A., Shoji, K. and Akiyama, I.: "A Study on Atomization of a Coal Water Mixture (1st Report, Atomizing Characteristics)", *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu,* **53**(493), 2890 (1987).
69. Nystr m, O.: "Atomization of Highly Loaded CWF's and the Effect of Type of Dispersant", Proc. of the 3rd European Conf. on Coal Liquid Mixtures", Malm , Sweden, October 14-15, pp. 357 - 372 (1987).
70. Daley, R. D., Farthing, G. A. and Vecci, S.J.: "Coal-Water Slurry Evaluation Volume 2: Laboratory and Combustion Test Results", Final Report, CS-3413, Babcock & Wilcox Co. (1984).
71. Manfred, R. K., Borio, R. W., Smith, D. A., Rini, M. J., LaFlesh, R. C. and Marion, J. L.: "Development of a Coal-Water Burner", ASME Paper No. 83-JPGC-Pwr-40, 10p. (1983).
72. Smith, C. F. and Williams, M. C.: "Methods to Improve Atomization Performance in a CWS-Fired Gas Turbine Combustor", Proc. of the Annual Int. Pittsburgh Coal Conf., Pittsburgh, Pa., 6(2), pp. 1068 - 1077 (1989).
73. Knell, E. W., Muzio, L. J. and Arand, J. K.: "Combustion Characteristics of Occidental Coal-Water Mixtures", Proc. of the 6th Int. Coal and Lignite Utilization Exhibition and Conference, Houston, Tex., November 15-17, 30 p. (1983).
74. Gillberg, L., Larsson, N., Mathiesen, M., Nystr m, O. and Persson, J. E.: "Some Rheological Data and Atomization Behavior of CWM's Containing 68 to 83% Coal", Proc. of the 5th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion and Technology, Tampa, Fla., April, 2 5-27, pp. 1229 - 1243 (1983).
75. Wigg, L. D.: "Drop-Size Prediction for Twin-Fluid Atomizers", *J. Inst. Fuel,* **27**(165), 500 (1964).
76. Andreussi, P., Tognotti, L., Graziadio, M. and Michele, G. D.: "Atomization of Coal-Water Fuels by a Pneumatic Nozzle : Characteristics of the Spray",

Aerosol Science and Technology, **13**(1), 35 (1990).
77. Ren, J., Huang, Z., Li, P., Cao, X., Yao, Q., Zhao, X., Tu, J., Liu, J., Lu, H., Cen, K., Hao, F. and Chen, F.: "The Atomization Mechanism of DZ-Type Coal-Water Slurry Atomizer", Proc. of the 18th Int. Technical Conf. on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, Fla., April 26-29, pp. 669 - 678 (1993).
78. Hedley, A. B. and Yiu, S. M.: "Droplet Size Distribution Changes During the Atomization of a Coal Water Slurry", Proc. of the 7th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, New Orleans, La., May 21-24, pp. 377 - 391 (1885).
79. Jasuja, A. K.: "Atomization of Crude and Residual Fuel Oils", ASME Paper No. 78-GT-83, 9 p. (1978).
80. De Michele, G., Graziadio, M., Morelli, F. and Quattroni, G.: "Atomization of Some Commercial and Moderate Loaded Coal-Water Slurries", Proc. of the 8th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Fla., April 25 -27, p. 176 (1986).
81. Garbett, E. S. and Yiu, S. M.: "The Atomisability of Coal-Water Mixtures", Proc. of the 3rd European Conference on Coal Liquid Mixtures, rm Malm ddot o, Sweden, October 14-15, pp. 121 - 132 (1987).
82. Andreussi, P., Giacomelli, A., Tognotti, L., De Michele, G., Graziadio, M. and Morelli, F.: "Characterization of a Pneumatic Nozzle", Proc. of the 4th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Sendai, Japan, August 22-24, pp. 271 - 277 (1988).
83. Huang, Y., Wang Y. S. and Gao L. J.: "The Mechanism of Pneumatic Atomization of CWS -- A Theory to Predict the Drop Size Distribution and SMD of the Spray", Proc. of the 15th Int. Conf. on Coal & Slurry Technologies, Clearwater, Fla., April 23-26, pp. 469 - 480 (1990).
84. Ren, J., Huang, Z., Li, P., Cao, X., Yao, Q., Zhao, X., Liu, J., Lu, H. and Cen, K.: "Research on the Atomization Process of a New Type of Atomizer", Proc. of the 17th Int. Conf. on Coal & Slurry Technologies, Clearwater, Fla., April 28-May 1, pp. 183 - 191 (1992).