

## 석탄-물 혼합연료(CWM)의 분무 특성 (I)

노남선<sup>†</sup> · 김정덕 · 김광호 · 김동찬 · 김종득\*

한국에너지기술연구소 연료기술연구팀

\*한국과학기술원 화학공학과

(1995년 2월 13일 접수, 1995년 7월 24일 채택)

## Atomization Characteristics of Coal-Water Mixture Fuel (I)

Nam-Sun Roh<sup>†</sup>, Jung-Duk Kim, Kwang-Ho Kim, Dong-Chan Kim and Jong-Duk Kim\*

Fuel Technology Research Team, Korea Institute of Energy Research, Taejon 305-343, Korea

\*Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejon

(Received 13 February 1995; accepted 24 July 1995)

### 요 약

레이저 빔의 회절원리를 응용한 분석장치를 사용하여 분무유량이 30-150 l/hr이고 1개의 노즐을 가진 내부혼합식 분무기에서 분사되는 석탄-물 혼합연료(CWM)의 액적 크기를 측정하였고, 노즐에서의 분출 특성을 조사하였다. 2.0 kg/cm<sup>2</sup> 이상의 분사압력에서는 임계흐름 현상이 발생하여 공기-물과 공기-CWM의 2상 유체를 분무시킬 경우에 공기의 질량속도와 분사압력 사이에는 직선적인 비례관계가 성립하였고, 공기의 분출계수는 노즐의 직경과 CWM의 유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 50-120 µm 범위의 MMD를 갖는 CWM 액적의 크기는 물 액적과 마찬가지로 공기/연료비의 증가에 따라 급격히 감소하다가 어느 수준 이상에서는 공급유량에 관계없이 일정한 값을 유지하였고, SMD는 (1+ 연료/공기비) 항과 지수적인 비례관계가 성립하였다. 또한 분무기로부터의 축방향 거리에 따라 CWM 액적의 크기는 직선적으로 커지며 obscuration은 감소하였다. CWM 액적의 MMD는 CWM 중에 존재하는 석탄 입자보다 약 20 µm 이상 크게 나타나므로 CWM 액적이 한 개의 석탄 입자만이 아닌 여러 개의 석탄 입자들과 물로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다.

**Abstract**—The atomization and discharge characteristics of coal-water mixture(CWM) fuel at the internal-mixing type atomizer with one exit hole were investigated using Malvern droplet size analyzer which is based upon the laser diffraction method. Test results showed that over the atomizing pressure more than 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, a critical flow phenomenon occurs, and that, consequently, a linearly proportional relationship is established between air mass velocity and absolute pressure in the mixing chamber, and further that the discharge coefficient of air is decreased with the increase of nozzle diameter and CWM mass velocity. The CWM droplet size in the range of 50-120 µm MMD was sharply decreased with the increase of air/fuel ratio, but was maintained at a fixed value over a certain level, regardless of the CWM feed rate. On the other hand, its SMD was in proportion to the 0.48 power of the term, (1+fuel/air ratio). Also, along with the axial distance from the atomizer, CWM droplet size was linearly increased and the obscuration was decreased. Since the MMD of CWM droplets is shown to be larger than that of coal particles in CWM fuel by more than about 20 µm, it was clearly verified that a CWM droplet consists of several coal particles and water, not just one coal particle.

**Key words:** Coal-Water Mixture(CWM), Atomization, Internal-Mixing Type Atomizer, Droplet Size

### 1. 서 론

최근에 유연탄 활용기술의 하나로 크게 주목받고 있는 석탄-물 혼합연료(CWM: coal-water mixture)는 고체인 석탄을 슬러리 상태의 액체로 변형하여 연소시킴으로써 고체연료가 가지고 있는 많은 불편함과 문제점을 해소시킬 수 있을 뿐 아니라 석탄의 액화나 가스화 기술에 비하여 경제성이 월등히 높고 대규모의 시설 투자비가 필요없이 단기간에 실용화가 가능한 대체 에너지원으로 평

가받고 있다[1, 2].

수분을 최소한 30 wt% 이상 함유하고 있는 고점도 유체인 CWM의 연소효율, 즉 탄소전환율(carbon conversion efficiency)은 연료의 성상, 분무기(atomizer) 및 버너의 성능, 운전 조건, 보일러의 용량 및 구조 등에 따라 많은 차이가 발생하나 보통 92-98%이다. 또한 보일러의 열효율은 연료 중의 수분에 의한 손실열과 미연탄소분(unburned carbon) 때문에 중유에 비해 약 10% 감소하며, 부하 조절비(turndown ratio)도 최대 4:1 정도로 중유에 비해 상당히

Table 1. Analyses of CWM feed coal

Item	Unit	Value
Proximate Analysis		3.70
Moisture		28.70
Volatile Matter	wt%	55.60
Fixed Carbon		12.00
Ash		
Ultimate Analysis*		
Carbon		69.85
Hydrogen		4.01
Nitrogen	wt%	0.81
Sulphur		0.40
Oxygen(by difference)		12.47
Ash		12.46
Gross Heating Value	kcal/kg	6770
True Density	kg/m <sup>3</sup>	1,495

\*moisture-free basis

났다. 그러므로 화염의 안정성과 부하 조절비를 높이고 미연탄소 분의 발생을 감소시켜서 석유연료와의 성능 차이를 줄이는 것이 CWM연료의 상용화를 위하여 매우 중요한 사항이다. 특히 CWM의 경우는 여러 개의 석탄 입자들과 물이 합체되어 단일 석탄 입자보다 직경이 훨씬 큰 액적(droplet)들이 연소과정을 거치게 되므로 액적의 크기와 직접 관련된 분무기의 무화성능(atomization quality)은 CWM연료의 연소효율을 높이고 안정된 화염을 유지하는데 결정적인 역할을 하는 것으로 확인되었다[2-6].

따라서 본 연구에서는 CWM연료의 연소에 가장 핵심적인 요소 이면서도 상대적으로 연구가 미진한 분무관계 분야에 대하여 분무특성을 이해하고 무화성능을 높일 수 있는 연료의 성상, 분무기의 구조 및 운전조건 등을 제시할 목적으로 최대 분무유량이 150 l/hr인 내부혼합식 분무기(internal-mixing type atomizer)를 이용하여 CWM연료의 분무실험을 수행하였다.

이번 논문에서는 레이저 회절원리를 적용한 Malvern droplet size analyzer가 부착된 분무실험장치를 소개하고, 공기, 공기-물 및 공기-CWM의 2상 유체(two phase fluid)에 대한 분출특성, 공기/연료비 (air/fuel ratio)에 따른 CWM 액적 크기의 변화, CWM 액적과 CWM 중에 존재하는 석탄 입자에 대한 입도분포의 차이 등을 살펴보았다. CWM의 유변학적 성질(rheological property), 표면장력, 석탄의 입도분포 등과 같은 연료의 물성, 분무기의 내부구조, 운전 조건 등과 같은 여러 가지 인자들이 CWM 액적의 입도분포에 미치는 영향과 각 인자들간의 상관관계에 대한 비교검토는 다음 논문에서 기술할 예정이다.

## 2. 실험

### 2-1. CWM연료의 제조 및 물성 측정

CWM연료는 최대 제조용량이 50 kg/hr인 ball mill에서 습식방법으로 제조되며, 유동화제(fluidizing agent)로서 Sodium Naphthalene Sulfonate의 일종인 CWM1002와 NaOH를 각각 0.4 wt%, 0.1 wt%의 비율로 첨가하였다[7]. CWM 제조에 사용된 석탄은 회분 함량이 12.0 wt%인 대동탄이며 주요한 물성분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

CWM 중의 석탄 농도는 CWM을 oven에서 105℃로 2시간 정도 건조시킨 후 무게 감량을 측정하여 계산하였다. 석탄의 입도 분포는 38  $\mu$ m(400 mesh) 이상의 범위에서는 wet sieving 방법을 이용하

였고, 38  $\mu$ m 이하의 입자는 Coulter Counter(model: TA II and PCA I)를 사용하여 측정하였다. 두 가지 방법으로 얻어진 측정값은 서로 합하여 석탄의 평균 입도를 MMD(mass median diameter)로 표시하였다.

### 2-2. 분무 실험

#### 2-2-1. 분무입도 측정장치

분무 액적의 입도 분포는 Fraunhofer diffraction 원리를 응용한 Malvern Co.의 액적크기 분석기(model: 2604C)를 이용하여 측정했다. 기기는 2 mW의 He-Ne 레이저를 발생시키는 transmitter, 레이저 빔을 9 mm(standard mode) 또는 18 mm(long-bed option)의 직경으로 확장시키는 beam expander, 산란된 빛을 감지하는 detector가 부착된 receiver, 데이터 처리용 컴퓨터 및 프린터로 구성되어 있다.

Transform lens로는 cut-off distance(측정대상 입자에 의한 산란광이 수광 범위에 들 수 있는 렌즈로부터의 최대 거리)가 780 mm이고 레이저빔의 직경이 18 mm인 600 mm 렌즈(액적크기의 측정가능 범위: 11.6-1128  $\mu$ m)를 채택하여 측정에 사용하였다.

분무실(spray chamber)은 최대 0.5 m<sup>3</sup>/hr의 분무량을 처리할 수 있는 2×2×4.2 m 규모이며 강판으로 제작되었다. 분무실 좌우로는 송신기와 수신기를 설치하고 분무기를 3차원적으로 이동시킬 수 있는 이송장치를 제작하여 분무되는 입도의 위치에서 입도 분포 측정이 가능하도록 구성하였다.

송신기와 수신기 사이에는 분무된 작은 입자들이 분무실 내부를 순환하면서 측정에 오차가 발생하는 것을 막기 위하여 light guide tube를 부착하여 레이저 빔이 이 속을 통과하도록 하였다. 또한 light guide tube는 튜브 사이의 간격을 조정함으로써 측정되는 액적군의 농도를 조절하여 적절한 투광도(obscuration)를 제공하는 중요한 역할도 한다[8, 9]. Guide tube는 이중관으로 제작되어 길이 조절을 임의대로 할 수 있고 액적들이 튜브 벽에 부딪히는 앞 면을 뒷 면보다 1.5 cm 정도 길게 가공하여 튜브에 의한 간섭을 최소화하였다. 또한 CWM의 경우는 물에 비하여 점도가 높기 때문에 guide tube 사이의 간격이 너무 좁으면 액적들이 서로 엉켜서 튜브 사이를 막히게 하므로 액적군의 직각방향으로 통과하는 레이저 빔의 길이는 약 20-30 mm 범위로 고정시켰다.

분무 액적의 측정위치는 Fig. 1과 같이 분무기 끝에서부터 guide tube를 통과하는 레이저 빔의 중심까지의 측정거리를 Z 방향으로 가정하였다. 또한 분무기 중심이 guide tube 사이의 측정간격의 중앙에 위치하고 분무기와 레이저 빔이 동일한 수평선상에 있을 때에 원추형의 액적군을 측방향(Z 방향)과 직각으로 절단하여 생기는 원을 중심으로 X 방향과 Y 방향을 정하였다.

#### 2-2-2. 분무 실험 설비

Fig. 2는 분무 실험 설비의 전체적인 구성과 배치를 보인 것이다. 분무설비는 저장탱크, 펌프, 유량계 등으로 구성된 연료 공급장치와 콤프레서, 압력 조절기, 유량계, 유량 조절용 밸브 등으로 구성된 분무용 공기 공급장치, 그리고 분무기와 액적 측정기기가 설치된 분무실로 크게 구분할 수 있다.

볼밀에서 제조된 CWM연료는 저장탱크로 옮겨지고 펌프에 의해 유량계를 거쳐 분무기로 공급된다. 연료의 유량은 펌프의 회전수를 변화시켜 조절하였고, 연료의 공급라인에는 재순환 라인, 연료샘플의 채취라인, 청소용 물 라인을 별도로 설치하였다. 최대 토출압력이 8.5 kg/cm<sup>2</sup>인 스크류 형식의 콤프레서에서 공급되는 분무용 압축 공기는 regulator에 의해 약 7.0 kg/cm<sup>2</sup> 정도의 압력으로 조절되며,

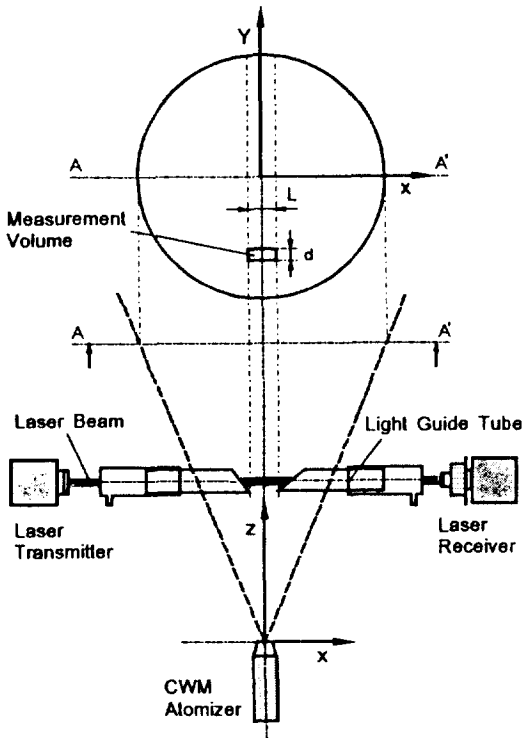


Fig. 1. Measurement positions of the CWM droplet size.

orifice meter와 분무기 사이에 위치한 니들밸브로 압축공기의 유량을 조절하였다.

### 2-2-3. 실험용 분무기

CWM연료의 분무에는 거의 대부분이 이류체 분무기(twin fluid atomizer)를 채택하고 있으며, 특히 그 중에서도 액체와 분무매체(atomizing medium)로 공급되는 기체가 노즐을 통해 분사되기

전에 서로 혼합되는 구조를 가진 내부혼합식 분무기가 가장 많이 사용되고 있다[1, 2, 8]. 따라서 실험용 분무기는 Fig. 3에 나타난 것처럼 1개의 노즐을 가지고 있고, 분무유량이 30-150 l/hr인 내부혼합식을 선택하였다. 분무기는 실험조건에 따라 노즐부분의 두께와 직경을 교체하여 테스트할 수 있는 구조로 제작되었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 분무기에서의 흐름 특성

일반적으로 CWM연료나 점도가 높은 액체연료를 연소시킬 때 사용되는 내부혼합식 분무기에서는 기체와 액체의 공급유량과 혼합실(mixing chamber)에서의 분사압력,  $P_M$ 이 서로 밀접한 상관관계가 있고, 이 두 가지 항목이 각 분무기의 내부구조와 크기에 따라 일정한 조건 이상으로 유지되어야만 양호한 분무상태를 얻을 수 있다[10, 11]. 따라서 본 내용에서는 앞에서 언급한 항목들을 중심으로 내부혼합식 분무기의 출구 노즐을 통해서 분사되는 공기-CWM의 2상 유체에 대한 분출 특성을 공기-물과 비교하여 살펴 보았다.

#### 3-1-1. 공기의 분출 특성

Fig. 4는 혼합실에서의 절대압력에 따른 공기의 질량속도 변화를 보인 것이고, Fig. 5는 ideal sonic flow에서 계산되는 이론적인 공기의 분출량과 실제 조건에서 측정되는 분출량의 비율로 정의되는 분출계수(discharge coefficient)의 변화 경향을 분무기의 노즐 직경별로 나타낸 것이다.

단열조건 아래에서 마찰손실이 없다고 가정할 때 단면적이 일정한 노즐을 통해서 이상기체가 분사되는 경우에는 임계흐름(critical flow) 조건하에서 공기의 질량속도,  $G_A$ 는 다음의 관계식으로 표시될 수 있다[11, 12].

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

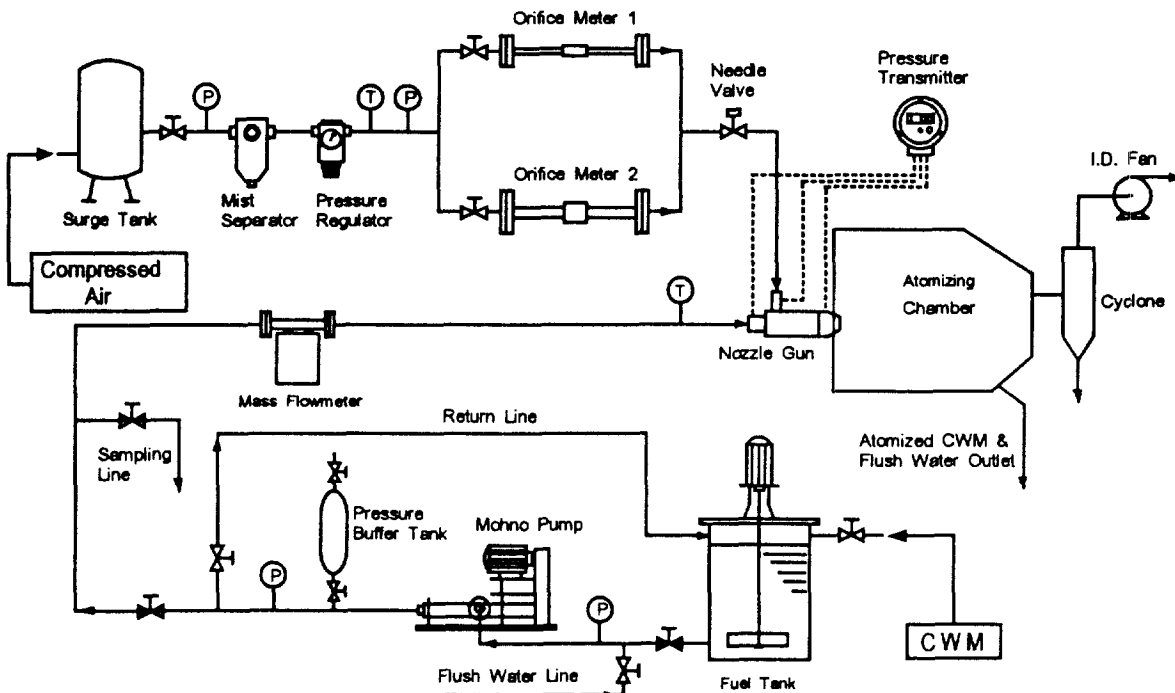


Fig. 2. Flow diagram of CWM atomization test facilities.

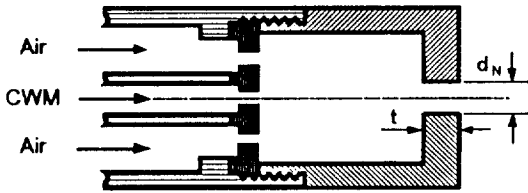


Fig. 3. Schematic diagram of internal mixing type atomizer with 1 exit hole.

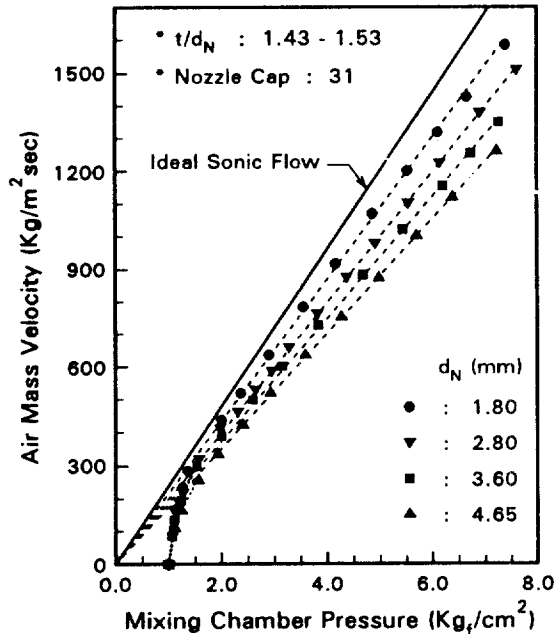


Fig. 4. Air mass velocity versus the absolute pressure in the mixing chamber (effect of nozzle diameter).

위 식에서  $R$ 은 기체상수,  $W_A$ 는 공기의 분자량,  $T_M$ 은 공기의 절대온도,  $P_M$ 은 혼합실에서의 절대압력,  $\gamma$ 는 일정압력과 일정부피에서의 비열의 비율을 각각 나타낸다.

Fig. 4를 살펴보면 실제로 측정된 공기의 질량속도는 모두 ideal sonic flow보다 낮고, 노즐의 두께/직경비가 일정한 조건에서는 노즐의 직경이 커질수록 공기의 분출량이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또한 혼합실에서의 분사압력이 약  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  이상으로 유지되면 노즐의 직경에 관계없이 임계유속 현상이 발생하여 공기의 질량속도와 혼합실 내부의 절대압력 사이에는 직선적인 비례관계가 성립되는 것을 확인할 수 있다.

공기의 분출계수는 Fig. 5에 나타난 것처럼 임계흐름 현상이 발생하기 전까지는 분무압력이 높아짐에 따라 급격히 증가하나 임계조건 이상의 압력에서는 노즐 직경에 따라 0.7-0.9 범위의 일정한 값을 유지하였다.

### 3-1-2. 공기-CWM의 분출 특성

Fig. 6은 직경이 3.60 mm인 노즐에서 액체(물)의 유량,  $M_L$ 을 매개변수로 하여 혼합실에서의 분사압력에 따른 공기의 질량속도의 변화경향을 측정한 결과를 나타낸 것이다.

그림을 살펴보면 액체의 유량에 관계없이 분사압력,  $P_M$ 과 공기의 질량속도,  $G_A$  사이에는 직선적인 관계가 성립하므로 공기만을 분사시킬 때와 마찬가지로 노즐을 통해 분무되는 공기-물 혼합유체 중에서 공기는 임계흐름 현상을 나타낼 수 있고, 액체의 공

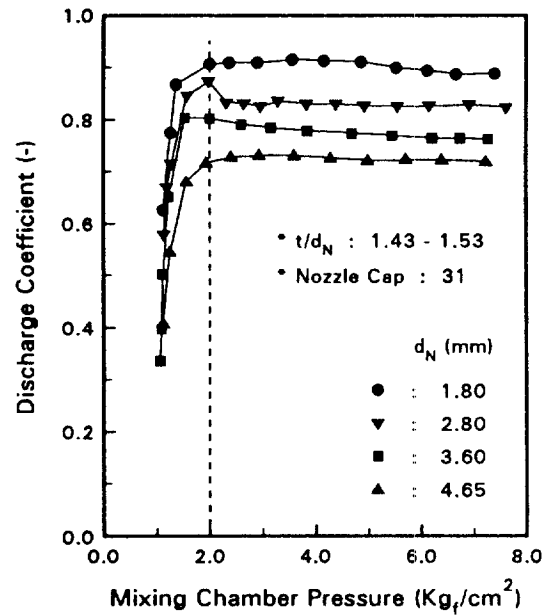


Fig. 5. Variation of discharge coefficient with the absolute pressure in the mixing chamber (effect of nozzle diameter).

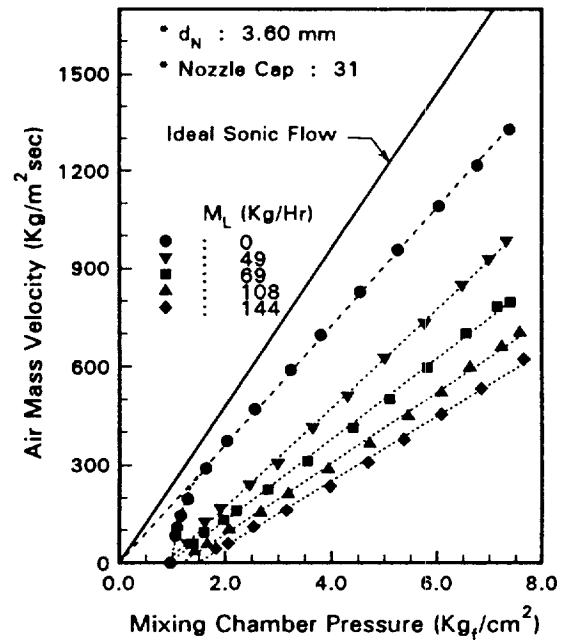


Fig. 6. Variation of air mass velocity with the absolute pressure in the mixing chamber (effect of water flow rate).

급유량이 많아질수록 분사압력에 따른 공기 분출량의 증가율이 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 6을 Fig. 4와 비교해 보면 공기만을 분사시킨 경우와 달리  $P_M$ 과  $G_A$ 의 관계가 그래프 상의 원점을 지나는 직선이 아닌 x절편을 갖는 직선으로 표시됨을 알 수 있다. 따라서 x절편을  $P'$ 라고 하면 공기-물의 2상 유체가 노즐에서 분사될 때  $P_M$ 과  $G_A$ 의 관계는 아래와 같이 표시될 수 있다.

$$G_A = B(P_M - P') \quad (2)$$

위 식에서 유차원 계수,  $B$ 는 ideal sonic flow에 적용되는 식 (1)을

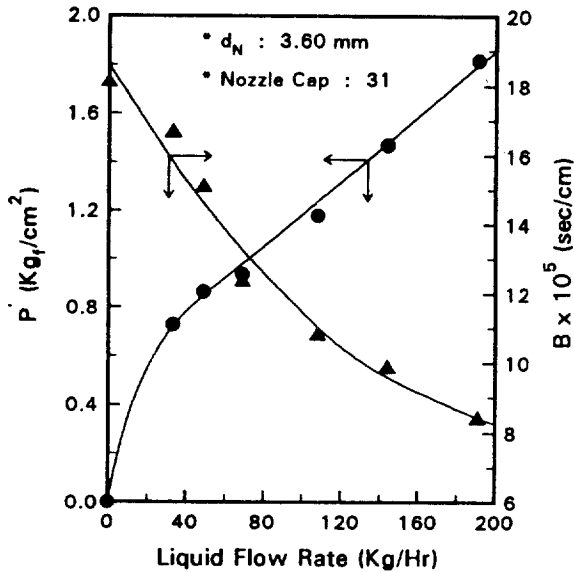


Fig. 7. Pressure loss( $P'$ ) and dimensional coefficient( $B$ ) versus water flow rate.

이용하면 다음과 같이 표시될 수 있으며, 여기서 무차원 계수,  $\alpha$ 는 단일조건에서 이상기체만을 분사시킬 때와 비교하여 액체 유량의 증가에 따른 공기 분출량의 감소를 보정해 주는 보정계수로 해석할 수 있다.

$$B = \alpha \cdot \left[ \frac{\gamma W_A}{RT_M} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

즉 다시 설명하면 실제로 노즐을 통한 기-액 2류체의 임계흐름에서 기체의 분출량을 결정하는 것은 혼합실에서의 절대압력,  $P_M$ 이 아니라 식 (2)에서 정의되는 ( $P_M P'$ )로 표시된다는 점이다. 또한 액체의 존재에 의해  $P'$ 로 표시되는 압력손실 현상이 발생하고 액체의 유량이 증가함에 따라  $P'$  값이 커지게 되는 것은 액체의 유입에 의해서 노즐의 전체 단면적에서 기체가 통과할 수 있는 면적이 감소한 것 이외에 비말된 액적들(entrained droplet)의 momentum 증가가 주된 원인인 것으로 판단된다. 다시 말하면 대부분의 액체가 노즐의 벽면을 따라 고리 모양의 층을 이루어 흐르고 일부분의 액체가 액적 형태로 비말되어 기체와 함께 중앙에 형성된 core를 통해 흐르는 환상-분산류(annular-dispersed flow)가 본 실험에 사용된 내부혼합식 분무기의 노즐을 통한 공기-물 흐름에 적용된다고 가정할 때 액체의 공급량이 증가하면서 기체 내로 분산되는 액적의 양이 많아지게 되어 위와 같은 압력손실 현상이 발생된다고 추측할 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6에 나타난 결과를 토대로 직경이 3.60 mm인 노즐에 대하여 식 (2)에서 정의된  $P'$ 와  $B$  값을 물의 공급유량에 따라 나타낸 것으로서 유량이 커짐에 따라  $P'$ 값은 증가하고  $B$ 는 감소함을 보여준다. 노즐을 통한 공기과 물의 2상 흐름이 환상 또는 분산류라고 가정할 때 액체의 유량이 증가하면 앞에서도 언급했듯이 노즐의 전체 단면적 중에서 공기가 통과할 수 있는 면적이 감소하게 되어 노즐을 통과하는 공기의 단위부피당 액체와 접촉하는 면적이 증가한다. 따라서 분사압력에 따른 공기 분출량의 증가율을 나타내는 유차원 계수,  $B$ 는 액체의 유량이 증가하면 액체와 공기간의 마찰손실이 커지게 되어 감소한다고 판단된다.

본 실험에 사용된 내부혼합식 분무기의 노즐을 통한 공기-물의 흐름 형태를 환상-분산류라고 가정할 것에 대한 타당성을 살펴보기

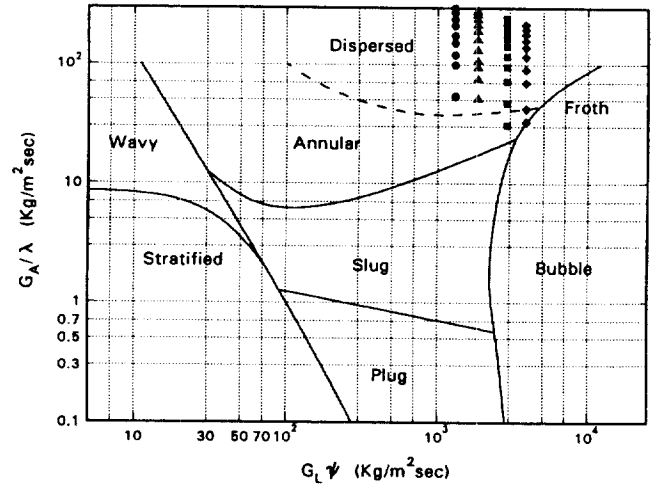


Fig. 8. Modified Baker's diagram for the air-water flow in nozzle.

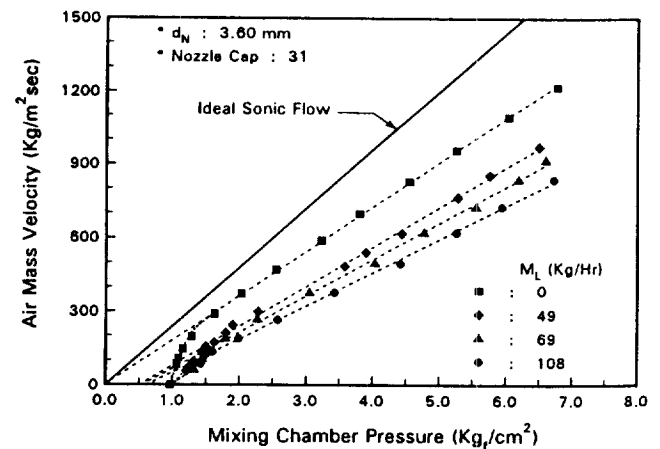


Fig. 9. Effect of CWM feed rate on the air mass velocity.

위하여 수평관에서의 흐름형태에 대해 제안된 여러 가지 flow map 중에서 대표적으로 Bell 등[13]이 제안한 modified Baker's diagram을 적용하여 흐름형태를 검토해 보았다. Bell 등이 제시한 flow map에 사용되는 무차원 계수는 다음과 같다.

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_G}{\rho_A} \right) \left( \frac{\rho_L}{\rho_W} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\psi = \left( \frac{\sigma_W}{\sigma_L} \right) \left[ \left( \frac{\mu_L}{\mu_W} \right) \left( \frac{\rho_W}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (5)$$

Fig. 8은 Fig. 6에 표시된 측정자료를 modified Baker's diagram에 나타낸 것으로서 노즐을 통한 공기과 물의 2상류에 대한 흐름 형태가 분산류 또는 분산-환상류의 영역에 포함됨을 보여주고 있다.

Fig. 9는 직경이 3.60 mm인 노즐에서 석탄 농도가 60.0 wt%인 CWM연료를 분사시켰을 경우에 공기의 질량속도를 분사압력에 따라 표시한 그림이다. 공기-물을 분사시킨 경우와 마찬가지로 모든 유량 범위에서 약 2.0 kg/cm² 이상의 압력을 유지하면  $P_M$ 과  $G_A$  사이에는 직선적인 비례관계가 성립하고 있다.

Fig. 9와 6을 비교해 보면 액체의 공급량이 같은 조건에서 CWM을 분사시킬 때가 압력손실,  $P'$ 의 값이 물에 비해 훨씬 적을 뿐만 아니라 CWM연료의 경우는 혼합실에서의 분사 압력이 1.0 kg/cm²에 접근

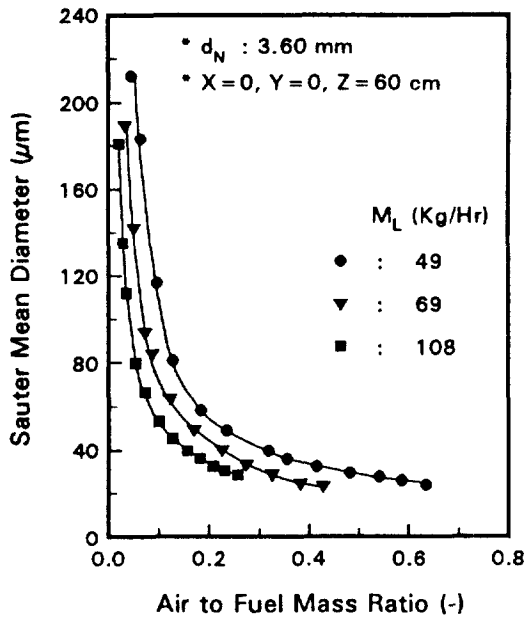


Fig. 10. SMD of water droplet with the A/F ratio at various liquid flow rates.

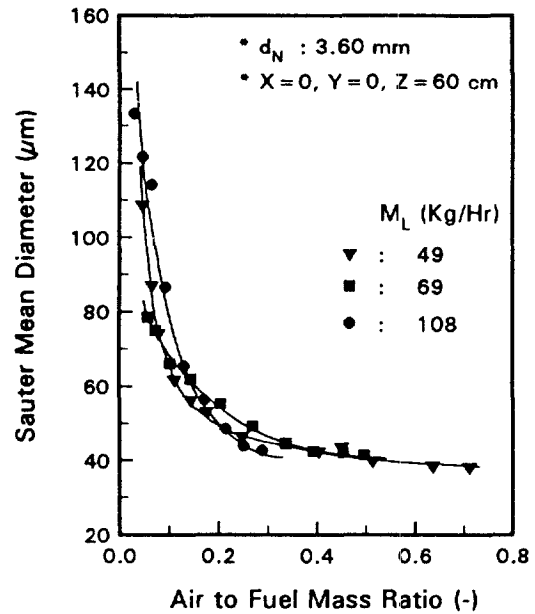


Fig. 11. SMD of CWM droplet with the A/F ratio at various liquid flow rates.

할수록 공기의 질량속도가 분사압력과 직선적 관계를 벗어나 임계흐름 조건 이하에서 공기만을 분사시킬 때와 유사한 관계를 나타내고 있음을 살펴볼 수 있다. 이는 CWM과 물의 점도 차이에 기인하는 것으로 생각되며 앞에서 P'의 발생 원인으로 추측되어진 내용들의 타당성을 뒷받침할 수 있는 실험결과라고 생각된다. 즉 CWM연료는 물에 비해서 약 500-1,000배 정도의 점도를 나타내므로 노즐에서 CWM의 유량이 증가하더라도 물의 경우만큼 많은 양의 액적들이 공기 흐름 속으로 분산되지 못하기 때문에 P'값이 물에 비해 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 분사압력이 대기압에 접근하면 공기 흐름에 의해 비말된 CWM 액적이 거의 없는 환상류(annular flow)에 접근하게 되어  $P_M$ 과  $G_A$ 의 관계가 Fig. 9에 나타난 것처럼 CWM이 차지하는 면적만큼 줄어든 단면적을 가진 노즐에서 공기만을 분무시키는 경우와 유사해지는 것으로 유추할 수 있다.

### 3-2. 분무액적의 입도 분포

CWM연료에 대한 분무실험과 병행하여 동일한 형태의 분무기에서 물 액적의 입도를 측정해 보았다. 분무용 액체로 물을 선택한 이유는 물이 취급하기가 쉬울 뿐 아니라 CWM이 고체인 석탄 입자와 액체인 물로 구성된 액체 상태의 연료이므로 두 가지 물질에 대한 실험결과를 서로 비교검토하는데 도움이 될 것이라고 판단했기 때문이다. 또한 액적의 입도 분포 측정장치를 보정하고 CWM에 대한 적절한 분무실험 조건과 범위 등을 결정하는데도 물이 이용되었다.

Fig. 10은 직경이 3.60 mm인 노즐에서 물을 분사시킬 때 노즐의 중심축과 동일한 직선 상( $X=Y=0$ )에서 노즐 끝에서부터의 거리가 60 cm인 부위( $Z=60$  cm)에서의 SMD(Sauter mean diameter) 변화를 액체의 공급량을 매개변수로 하여 공기/연료비에 따라 표시한 그림이다.

물 액적의 SMD는 30-200  $\mu$ m 정도이며, 모든 유량 범위에서 공기/연료비가 감소하면 액적의 SMD가 급격히 증가하고 공기/연료비가 커짐에 따라 SMD는 점차 감소하여 액체의 유량에 관계없이

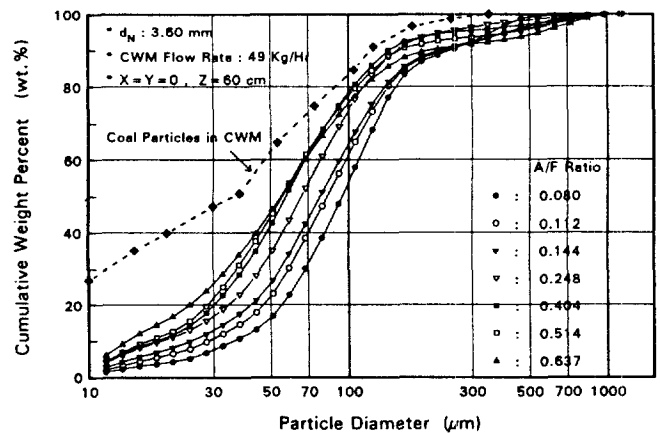


Fig. 12. Comparison of cumulative size distribution of CWM droplet with the coal particles in CWM.

일정한 값에 접근하게 된다. 또한 공기/연료비가 일정한 조건하에서는 물의 공급유량이 많을수록 액적의 평균직경도 커짐을 그림에서 볼 수 있다.

Fig. 11은 첨가제와 NaOH를 각각 0.4, 0.1 wt%의 비율로 혼합하여 제조된 석탄 농도 60.0 wt%의 CWM연료를 직경이 3.60 mm인 노즐을 통해 분사시켰을 때 액체의 공급량을 매개변수로 하여 공기/연료비에 따른 액적의 SMD를 표시한 것이다. SMD는 40-140  $\mu$ m 정도로 물 액적의 크기와 비슷하게 측정되었고, 물을 분사시킨 경우와는 달리 CWM의 유량변화에 관계없이 공기/연료비에 대한 액적 크기의 변화값이 모두 동일한 곡선 상에 놓여 있음을 그림에서 볼 수 있다. 또한 공기/연료의 무게비가 커짐에 따라 액적의 평균직경은 급격히 감소하다가 0.3 이상의 공기/연료비에서는 CWM의 공급유량에 관계없이 40  $\mu$ m 정도의 SMD를 유지하였다.

Fig. 12는 Fig. 11에 나타난 실험조건에서 측정된 CWM 액적의 입도분포와 CWM 중에 포함된 석탄 입자의 입도 분포를 같은 그

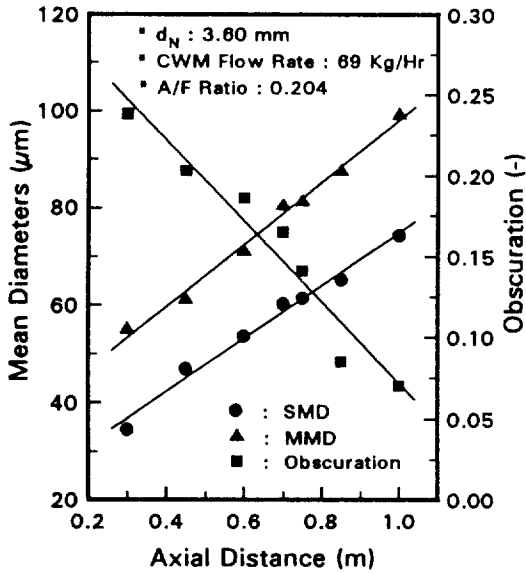


Fig. 13. Variations of mean diameters and obscurations of CWM droplet with the axial distance.

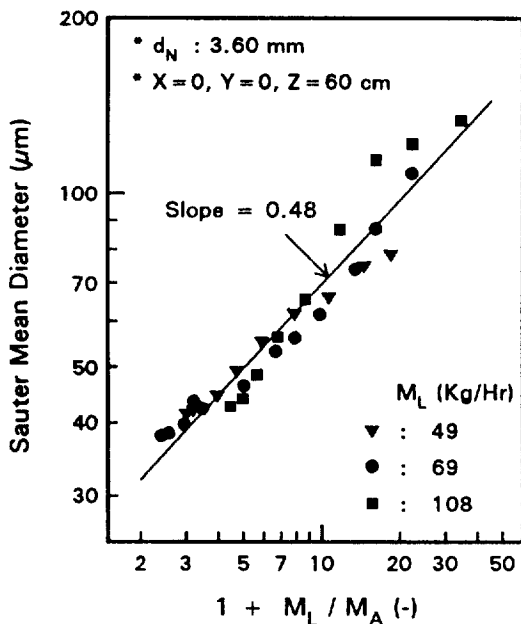


Fig. 14. SMD of CWM droplet versus  $1 + (M_L/M_A)$ .

래프에서 비교한 것이다. 연료 중에 함유된 석탄의 입도 분포는 aperture의 직경이 100  $\mu\text{m}$ 이고 측정범위가 1.3-50.8  $\mu\text{m}$ 인 Coulter Counter와 wet sieving 방법을 이용하여 측정되었다.

그림을 살펴보면 공기/연료비가 서로 다른 모든 분무 조건에서 CWM 액적의 평균직경이 슬러리 중에 포함된 석탄 입자들의 평균직경보다 20  $\mu\text{m}$  이상 큰 것을 알 수 있는데 이는 곧 CWM 액적들이 모두 한 개의 석탄 입자나 순수한 물 입자로만 구성된 것이 아니라 여러 개의 석탄 입자들과 물 또는 한 개의 입자와 물이 합체하여 형성되었다는 사실을 의미하는 것으로 해석될 수 있다[14-16].

Fig. 13은 노즐 끝 부위에서부터 레이저 빔에 의해 액적의 크기가 측정되어지는 지점까지의 측정거리, Z에 따른 CWM 액적의 평균직

경과 투광도의 변화를 나타낸 그림이다. 액적군에 의해 산란된 레이저 빔의 세기를 표시하는데 이용되는 투광도(obscurtion)는 일반적으로 분무액체의 물성, 입도 분포의 측정 위치, 공기/연료비, 레이저의 통과길이 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 다음과 같이 정의되어진다[17].

$$\text{Obscuration} = 1 - I = 1 - I_0 \exp(-ACL) \quad (6)$$

물의 경우와 마찬가지로 측거리가 길어질수록 CWM 액적의 평균직경은 직선적으로 증가하였다. 측거리가 따라 투광도가 감소하는 것은 노즐에서부터의 거리가 멀어질수록 액적의 평균 입경이 커지고 액적군의 단면적이 증가하여 단위 체적당의 액적수가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 14는 SMD와  $1 + (M_L/M_A)$ 의 관계를 대수그래프에 나타낸 것으로 물의 경우와는 상이하게 CWM의 유량에 관계없이 모든 측정값을 기울기가 0.48인 직선으로 표시할 수 있음을 나타낸다. 이와 같이 CWM연료가 내부혼합식 분무기에서 분사될 때  $1 + (M_L/M_A)$  항이 액적의 평균크기를 결정하는데 중요한 인자라는 사실은 Cronin 등[18], Thambimuthu 등[19], Tsai와 Vu[20], Kang 등[21], Smith 등[22]에 의해서 확인된 바 있으며, 본 실험에서 계산된 기울기는 Pohl 등[23]이 제시한 0.50에 근접한 수치이다.

#### 4. 결 론

레이저의 회절원리를 응용한 액적크기 분석장치를 이용하여 직경이 1.80-4.65 mm인 1개의 노즐로 구성된 내부혼합식 분무기를 통해 분사되는 CWM 액적의 입도분포를 측정하고 노즐에서의 분출 특성을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 공기-CWM의 2상 유체를 분무시킬 경우에 분무압력이 약 2.0 kg/cm<sup>2</sup> 이상인 범위에서는 임계흐름 현상이 발생하여 공기의 질량속도와 혼합실 내부의 절대압력 사이에는 직선적인 비례관계가 성립하였고, 공기의 분출계수는 노즐의 직경과 CWM의 유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

(2) 50-120  $\mu\text{m}$  범위의 MMD를 갖는 CWM 액적의 크기는 공기/연료의 무게비가 커짐에 따라 급격히 감소하다가 0.3 이상의 공기/연료비에서는 CWM의 공급유량에 관계없이 40  $\mu\text{m}$  정도의 SMD를 유지하였다.

(3) 49-108 kg/hr의 유량 범위에서 CWM 액적의 SMD는  $(1 + \text{연료/공기비})^{0.48}$  항과 비례관계가 성립하였고, 분무기로부터의 측방향 거리가 길어지면 CWM 액적의 평균직경은 직선적으로 증가하나 투광도는 반대로 감소하였다.

(4) CWM 액적과 CWM연료 중에 존재하는 석탄 입자의 입도 분포를 비교하면 석탄 입자의 MMD가 약 20  $\mu\text{m}$  이상 크게 측정되므로 CWM 액적들이 모두 한 개의 석탄 입자나 순수한 물 입자로만 구성된 것이 아니라 여러 개의 석탄 입자들과 물 또는 한 개의 입자와 물이 합체하여 형성되었다는 사실을 확인할 수 있었다.

#### 사용기호

- A : projected particle area/unit weight of particles [ $\text{m}^2/\text{Kg}$ ]
- B : dimensional coefficient in Eq. (2) [ $\text{sec}/\text{m}$ ]
- C : weight concentration of particles [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]
- d : diameter [ $\text{m}$ ]

G : mass velocity in the exit holes [ $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ ]  
 I : intensity of transmitted light [-]  
 $I_0$  : intensity of incident light [-]  
 L : path length over which particle/light interactions occur [m]  
 M : mass flow rate [ $\text{Kg/sec}$ ]  
 $P'$  : pressure correction for the critical discharge from the mixing chamber [Pa]  
 $P_M$  : static pressure in the mixing chamber [Pa]  
 R : gas constant [ $\text{Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{K} \cdot \text{mol} \cdot \text{sec}^2$ ]  
 t : nozzle thickness [m]  
 $T_M$  : absolute air temperature in the mixing chamber [K]  
 W : molecular weight [ $\text{mol}^{-1}$ ]  
 X : radial distance from the nozzle tip [m]  
 Y : vertical distance from nozzle center [m]  
 Z : axial distance from the nozzle tip [m]

#### 그리스 문자

$\alpha$  : dimensionless coefficient in Eq. (3) [-]  
 $\gamma$  : ratio of specific heats at constant pressure and constant volume [-]  
 $\lambda$  : dimensionless coefficient defined by Eq. (4) [-]  
 $\mu$  : viscosity [ $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ]  
 $\rho$  : density [ $\text{Kg/m}^3$ ]  
 $\sigma$  : surface tension [ $\text{N/m}$ ]  
 $\psi$  : dimensionless coefficient defined by Eq. (5) [-]

#### 하첨자

A : air  
 G : gas  
 L : liquid or CWM fuel  
 N : nozzle  
 W : water

#### 참고문헌

- 김동찬 외 : "CWM의 연소효율 증대를 위한 버너 및 분무기술 개발 연구 (IV)", 한국에너지기술연구소 연구보고서, KRC-90G-T20(1991).
- 노남선 외 : 한국에너지공학회지, 3(2), 130(1994).
- Olen, K. R.: ASME Paper No. 84-JPGC-FU-D(1984).
- Papachristodoulou, G. and Trass, O.: *Can. J. Chem. Eng.*, **65**, 177(1987).
- Holve, D. J., Fletcher, T. H. and Gomi, K.: *Combust. Sci. and Tech.*, **52**, 269(1987).
- Kang, S. W.: Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass.(1988).
- Roh, N. S., Shin, D. H., Kim, D. C. and Kim, J. D.: *Fuel*, in press (1995).
- Lefebvre, A. H.: "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corp., New York(1989).
- Meyer, P. and Chigier, N.: *Atomization and Spray Technology*, **2**, 261(1986).
- Mullinger, P. J. and Chigier, N.: *J. Inst. Fuel*, **47**, 251(1974).
- Graziadio, M., Andreussi, P., Tognotti, L. and Zanelli, S.: *Atomization and Spray Technology*, **3**, 187(1987).
- Andreussi, P., Giacomelli, A., Tognotti, L., De Michele, G., Graziadio, M. and Morelli, F.: Proc. of the 4th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Sendai, Japan, August, 271(1988).
- Bell, K. J., Taborek, J. and Fenoglio, F.: *Chem. Engng. Symposium Series*, **66**(102), 150(1970).
- Yu, T. U. and Beer, J. M.: Proc. of the 14th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April, 191(1989).
- Sato, K., Shoji, K., Okiura, K., Akiyama, I. and Baba, A.: *Powder Technology*, **54**, 127(1988).
- Kaneko, S., Tokuda, K., Noda, M. and Maruta, T.: Proc. of the 14th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April, 221(1989).
- Meyer, P. L. and Chigier, N.: Proc. of the 8th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, Orlando, Fla., April, 144(1986).
- Cronin, L., Sojka, P. E. and Lefebvre, A. H.: Proc. of the Int. Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, Tulsa, Okla., October(1985).
- Thambimuthu, K. V., Whaley, H. and Lee, G. K.: Proc. of the Int. Symp. on Multi-phase Flows, Hangzhou, China, August (1987).
- Tsai, S. C. and Vu, T.: *Fuel*, **66**(11), 1596(1987).
- Kang, S. W., Yu, T. U. and Beer, J. M.: Proc. of the Fossil Fuels Combustion Symp. 1989 : 12th Annual Energy-Sources Technology Conference and Exhibition, Houston, Tex., January, 71(1988).
- Smith, C. F., Sojka, P. E. and Thames, J. M.: *Trans. ASME : J. Eng. for Gas Turbines and Power*, **112**, 15(1990).
- Pohl, J. H., Sepulveda, J. and Rothfeld, L. B.: Proc. of the 7th Int. Symp. on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, New Orleans, La., May, 357(1985).