

〈論 文〉

# 액막형 동축노즐의 2상 난류분사의 미립화 특성에 관한 실험적 연구

노병준 · 강신재 · 오제하

(1994년 12월 21일 접수)

## An Experimental Study on the Atomization Characteristics of a Two-Phase Turbulent Jet of Liquid Sheet Type Co-Axial Nozzle

Byung-Joon Rho, Shin-Jae Kang and Je-Ha Oh

**Key Words** : Sheet Type Co-axial Nozzle(액막형 동축노즐), Two-Phase Jet(2상 분무), Immersion Sampling Method(액침법), Image Processing Technique(영상처리기법), Size Distribution Function(크기분포함수), SMD(Sauter Mean Diameter ; 평균직경)

### Abstract

In this study, a liquid sheet type co-axial nozzle has been used to investigate the turbulent atomization characteristics which could result in the experimental data to be used in designing a jet nozzle with high performance. Image processing technique and immersion sampling method were employed to measure droplet size. In atomizing characteristics, droplet size distributions and absolute droplet sizes, SMD(Sauter Mean Diameter) have been investigated in the wide ranges of flow field depending upon the air-water mass ratios. And the comparisons between the present data and the semi-empirical curves have been conducted semi-empirical correlation for SMD has been derived in the present analysis.

### 1. 서 론

2상 분무노즐을 이용한 연구는 공기와 연료의 혼합과 미립화 성능향상을 도모하고, 고성능 노즐 개발을 위한 설계의 기초 자료를 얻기 위하여 많이 수행되고 있다.

혼합과 미립화 그리고 미립화된 입자들의 균일분포유동은 연소기관에서 뿐만 아니라 농업용 살포기나 도장용 분무기에서도 요구되는 중요한 조건들이다.

2유체 분무노즐은 용도에 따라 구조가 다양하다. 그러나 유체공학적인 측면에서 살펴보면 혼합과 미립화를 위한 분무조건은 결국 액체와 기체의 고속 분사와 이 두 분사류들의 상호충돌에 의한 심한 난류의 발생이 선행되어야 한다. 밀도가 다른 두 유체입자들의 충돌에서 발생된 3차원의 난류성분들은 유동장내에서 난류혼합유동을 형성하며, 따라서 액체입자들의 확산과 분포, 그리고 유동조건을 제어했을 때에 미립화된 분무유동장은 균일분포유동까지 기대할 수 있다.

분무의 미립화 특성과 노즐의 성능향상을 위한 연구는 이론적이고 기초적인 분야에서부터 응용에 이르기까지 다양하게 이루어 지고 있다.

Zanelli<sup>(1)</sup>는 액체분무의 거동에 관한 연구에서 1

\*정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

\*\*정회원, 전북대학교 우주항공공학과

\*\*\*정회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

차적으로 분열현상에 대하여 연구를 수행하여 분열의 모델화를 구상하였으며, 분무각과 분열길이를 예측할 수 있는 관계식을 제시하였다. 2차적으로는 정상상태에서 고속분류의 분열에 대하여 사진기법을 통해 연구를 수행하였다.

Ohtani<sup>(2)</sup>는 에너지절약에 역점을 두어 공기무화기를 개발하기 위하여 석유와 중유를 이용하여 미립화 특성을 실험적으로 연구하였고, Tabata 등<sup>(3)</sup>은 주위의 압력을 상승시킨 디젤분무에서 레이저 회절기법(laser diffraction method)을 적용하여 입자들의 SMD(sauter mean diameter) 계측에 관한 연구를 수행하여 SMD의 무차원 해석에 의한 실험식을 제시하였다.

Pindolia 등<sup>(4)</sup>은 분사기의 기하학적 조건이 공기분사 무화기의 성능에 미치는 연구에서 분사오리피스의 설치방향이 미립자 크기의 성능에 상당한 영향을 미치고 있다고 주장 하였다.

또한 Saito 등<sup>(5)</sup>은 EFI(electronic fuel injector) 시스템에서 연료의 무화성능 향상을 위한 연구에서 미립자의 SMD를 50  $\mu\text{m}$ 이하로 낮출 수 있도록 분무노즐을 개선하는데 중점을 두었으며, 최근에는 가습, 냉각, 코팅 등에 사용할 수 있도록 안개와 같은 극히 작은 미립자를 균일하게 발생 시킬 수 있는 2상 충돌분사 무화노즐의 개발에 관한연구가 Ohnish 등<sup>(6)</sup>에 의해 수행되기도 하였다.

2상 충돌분무에서 무화의 특성은 결국 난류의 특성에 크게 좌우되므로, Bachalo 등<sup>(7)</sup>은 감속유동과 심한 난류가 발생하는 2상 유동에서 입자들의 속도성분을 동시에 계측하여 입자들의 반응을 정량적으로 분석 기술하였다. 나아가서 무화성능을 향상시키기 위한 연구로서 Blümke 등<sup>(8)</sup>도 2상 유동에서의 입자의 크기가 난류의 특성에 미치는 영향에 대하여 PDPA(phsae Doppler particle analyzer)와 LDV(laser Doppler velocimeter)를 이용하여 연구를 수행하였고, Mao 등<sup>(9)</sup>은 공기선회 무화기분무(air assist swirl atomizer sprays)에서 입자크기 분포와 공기의 속도계측에 관한 연구를 수행하여 SMD와 유량비(공기/연료)의 관계식을 구하였으며, 그 결과 SMD는 유동방향과 축방향의 거리의 증가에 비례관계가 있음을 규명 하였다.

Nukiyama 등<sup>(10)</sup>은 무화된 액체의 미립자들의 크기분포에 대한 실험적 연구에서 얻은 결과를 토대로 입자들의 크기분포에 관한 확률적 분포함수를 반실험식으로 제시하여 근래에, 본 분야의 연구에

많이 활용되고 있으며, Rosin 등<sup>(11)</sup>도 실험결과를 토대로 입자들의 크기분포에 관한 반실험식을 발표하였다. 이상과 같은 연구동향과 관련하여 Rho 등<sup>(12-15)</sup>은 2유체 분무노즐을 액주형과 액막형 노즐의 2유체로 구분하여 분무의 미립화 특성을 실험적으로 연구 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 2유체 액막형 동축노즐을 설계 제작하여 공기와 액체(물)의 질량비의 변화에 따른 미립화 특성을 실험적으로 연구하였다. 액체 입자들의 포집방법은 액침법(immersion sampling method)을 사용하였으며, 크기계측은 CCD카메라, 현미경, 컴퓨터를 이용하여 분석처리하여 데이터의 신뢰성을 높였다.

## 2. 실험장치 및 계측방법

액막형 동축노즐은 Fig. 1에서 제시된 바와 같이 액체가 중심부에서 0.5 mm두께의 원형막을 형성하면서 분사되고, 액체 원형막 외부에 0.5 mm의 두께를 갖는 원형공기 분류가 이루어 질 수 있도록 설계 되었다. 노즐출구의 상세도와 크기는 Fig. 1에 제시된 바와 같으며, 노즐내면은 유체의 마찰저항을 고려하여 충분히 정밀가공되어 있고 재질은 스테인레스강을 사용 하였다. 속도가 다른 원형막의 두 분사류가 분출직후 충돌혼합유동과정에서 액체의 분열과정을 거쳐 미립화를 발생하게 되므로 노즐출구는 분출직후 압력이 다른 외부공기와 충돌하는 분사류의 불안정상태를 최소화하기 위하여 출구가 45°로 확산되도록 제작 하였다.

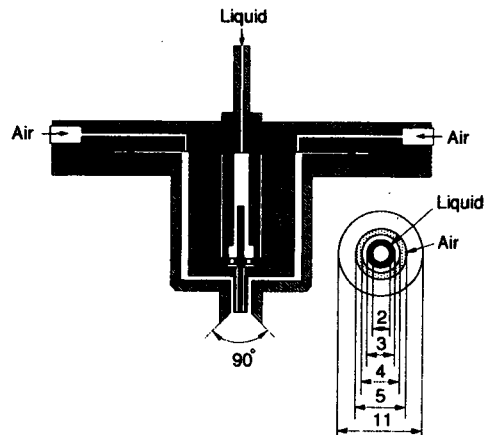
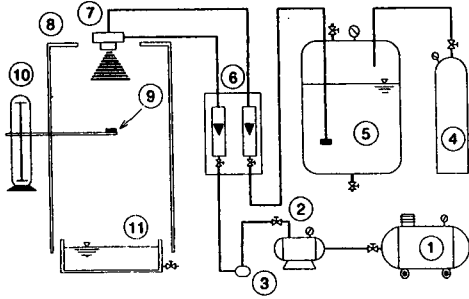


Fig. 1 Details of liquid sheet type co-axial nozzle (unit : mm)



- ① Compressor
- ② Pressure controller
- ③ Air filter
- ④ Gas bomb
- ⑤ Liquid tank
- ⑥ Flowmeter part
- ⑦ Nozzle
- ⑧ Supporting frame
- ⑨ Sampling device
- ⑩ Traversing equipment
- ⑪ Water receiver

Fig. 2 Schematic arrangement of the experimental system

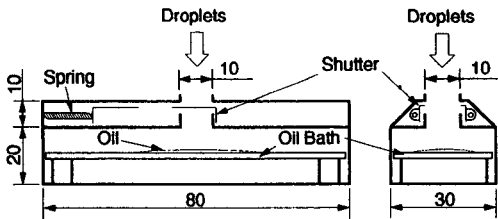


Fig. 3 Schematic diagram of the droplet sample equipment

공기와 액체의 분사류를 얻기 위하여 Fig. 2와 같이 액체공급부와 기체공급부를 설치 하였다. 액체공급부에서는 압력에 의하여 액체가 일정하게 공급될 수 있도록 압력수조를 스테인레스강판으로서 원통형으로 제작하였으며, 이 안에 채워져 있는 물에 압력을 가하기 위하여 질소가 충전된 압력용기를 사용하였다. 공급되는 공기압력과 물의 양을 조절하기 위하여 연결관로에 밸브를 설치하였고, 물의 공급량은 불유량계를 설치하여 미세한 조절이 가능하도록 하였다.

기체공급부에는 공기압축기와 압력제어 탱크 그리고 공기여과기가 장착되었다. 공기압축기에서 압송되는 공기의 맥동현상이 압력제어 탱크에서 제어되어 여과기를 거쳐 불유량계를 통과하는 동안 맥

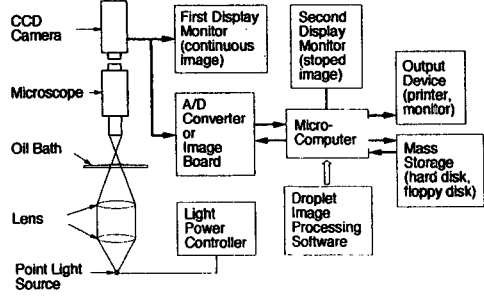


Fig. 4 Block diagram of the image processing equipment

동의 영향이 전혀 나타나지 아니하였다. 정확하고 미세한 공기량을 제어하기 위하여 불유량계를 병렬로 설치하여 사용 하였다.

미립화된 입자의 크기를 측정하기 위하여 액적을 포집하는 액침법을 적용 하였으며, 그 포집장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 이 장치를 유동장에 위치시켜 직경이 10 mm인 구멍으로 유입되는 입자들은 표준형 슬라이드 글라스(76 mm×26 mm)에 실리콘 오일을 도포하여 그 안에 포집되도록 하였다.

예전에는 유리판에 포집된 입자들의 크기측정은 사진기법을 적용하여 실측 하였으나, 현상 및 인화 과정과 실측과정에서 오측될 가능성이 있었다. 그러나 근래에는 화상처리(image process)기법이 활용되어 계측데이터의 신뢰성을 높여주고 있다.

Fig. 4는 화상처리의 개략도를 도시한 것이다. 포집된 입자들은 현미경(Parco ORION)에 점안시켜 확대한 후 CCD카메라(SONY CCD-F70)를 통하여 컴퓨터에 전송시켜 A/D변환기와 S/W를 사용하여 직경이 계측 되었다.

분출되는 기체와 액체의 유량은 기체(공기)의 경우 25.04~170.26(l/min)의 범위에서, 그리고 액체(물)의 분출유량은 0.03~0.06(kg/min)의 범위에서 조절되어 질량비(공기/물)는 1.0~6.0으로 제어 되었다. 그리고 측정위치로 노즐출구로부터 무차원화된 거리  $X/Deq=33.3, 66.7, 100, 133.3$ 의 위치를 설정하여 실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

노즐선단으로부터 분출되어 나오는 액체는 주위 기체와의 상호작용으로 인해서 분열이 이루어지기 시작한다. 이 경우 주위기체와 액체간의 상대속도

및 액체와 기체의 질량비 등에 따라서 분열의 정도가 결정된다. 본 연구에서는 임의로 고정된 액체유량에 대하여 분사기체의 유량을 조절함으로써 미립화의 정도를 파악해 보았다.

Fig. 5는 액체유량을 0.04 kg/min으로 고정시킨 상태로  $X/Deq=66.7, 133.3$ 에서 기체대 액체의 질량비를 1.0에서 5.0까지 변화시켰을 때 분열이 이루어진 액체입자들의 크기분포상태를 표시한 그림이다.

가로축은 액적의 크기구간을 나타내고 있으며, 세로축은 그 구간에 해당하는 액적의 수확률밀도(number probability density)를 표시하고 있다. 가로축에 해당하는 크기구간  $D$ 는 각각의 조건에 따라 그 크기구간이 다른데, 각 조건에 대하여 최대지름이  $100 \mu m$  이상인 경우에는 크기  $\Delta D$ 를  $10 \mu m$ 로 택했으며 최대지름이  $100 \mu m$  미만인 경우에는 그 값을 10으로 나눈 값에서 소수점 이하를 버린 값을 사용하여 크기구간을 표시했다.

그림에서 알 수 있듯이 고정된 액체유량에 대하여 축방향거리변화에 관계없이 질량비가 증가할수록 액적의 수확률밀도(number probability density)의 분포선도가 액적경이 작은 좌측으로 이동하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 질량비(mass ratio)가 증가함에 따라서 분사되는 공기유량이 많아져 액체와의 마찰력이 커지고, 결과적으로 무화과정이 급격하게 촉진되고 있음을 의미한다. 그러나 질량비가 어느 정도 증가한 이후에는 무화과정이 더이상 크게 진전되지 않고 있는 양상을 보이고 있다.

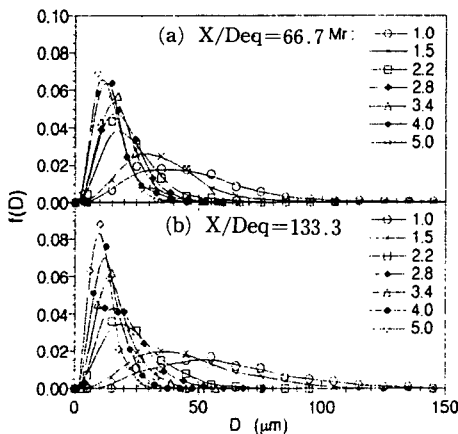


Fig. 5 Size distributions of the atomized droplets measured with the variations of mass ratio on the centerline ( $Q=0.04 \text{ kg/min}$ )

Fig. 6은 질량비를 1.0으로 일정하게 고정시킨 상태에서 액체유량을 변화시켜 가며 축방향 하류로 갈 때의 변화양상을 도시한 것이다. 전반적으로 액체유량에 관계없이 하류로 나아감에 따라 수확률밀도의 정점(peak point)이 낮아지는 경향이 있으며 분포자체가 완만해지고 있다. 이것으로 볼때 노즐 선단부보다는 하류로 내려갈수록 액적들의 분포형태가 보다 불균일한 분포양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

동일한 조건 아래에서 질량비를 3.4로 높였을 때의 수확률밀도를 표시한 것이 Fig. 7이다. Fig. 6의 낮은 질량비와 비교해 보았을 때 높은 질량비에서는 축방향 거리와 관계없이 모든 분포양상이 큰 변화를 보이지 않고 있다. 즉, 질량비가 높을 경우에는 액체유량과 축방향거리에 관계없이 질량비가 가장 큰 인자로 작용하며, 질량비가 낮을 경우에는 축방향 및 액체유량도 고려해야 함을 알 수 있다.

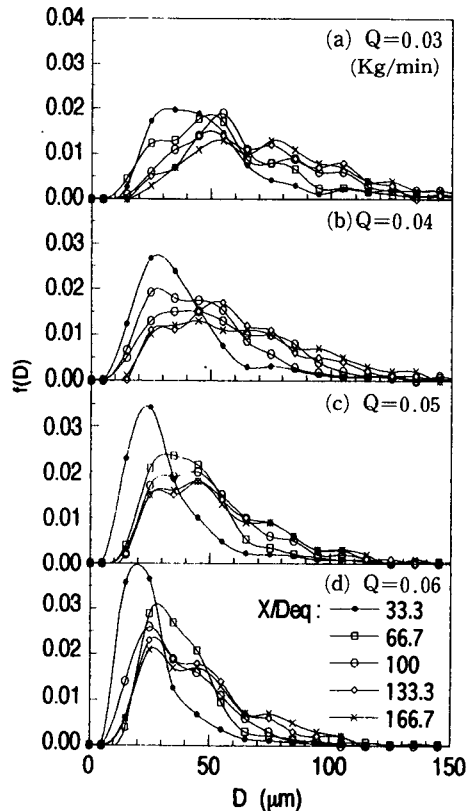


Fig. 6 Size distributions of the atomized droplets measured on the centerline depending upon the liquid flow rates ( $Mr=1.0$ )

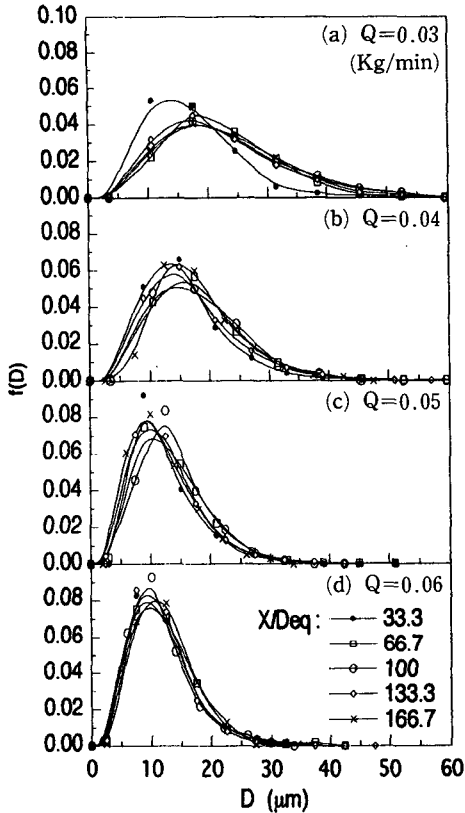


Fig. 7 Size distributions of the atomized droplets measured on the centerline depending upon the liquid flow rates ( $Mr=3.4$ )

액적의 크기분포를 수학적인 형태로써 표현하고자 하는 시도가 여러 학자들에 의해 꾸준히 있어왔는데 일반적으로 많이 사용하고 있는 식으로는 Nukiyama-Tanasawa 분포함수, Rosin-Rammler 분포함수와 같은 경험식들과 함께 log-normal 분포함수, upper-limit 분포함수 등과 같은 통계학적인 표현식들이 자주 이용되고 있으며, 이러한 분포함수들을 변형한 다양한 함수들이 현재도 꾸준히 제시되고 있다.<sup>(16)</sup> 본 연구에서는 이렇게 다양한 함수형태 중에서도 사용빈도가 높고 기본이 된다고 생각되는 위에서 언급한 네가지 분포함수들을 비교 분석하였다.

이들 분포함수는 다음과 같이 정의된다.

Log-normal 분포함수 :

$$f(D) = \frac{1}{D \cdot S_c \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln D_{CM})^2}{2S_c^2}\right] \quad (1)$$

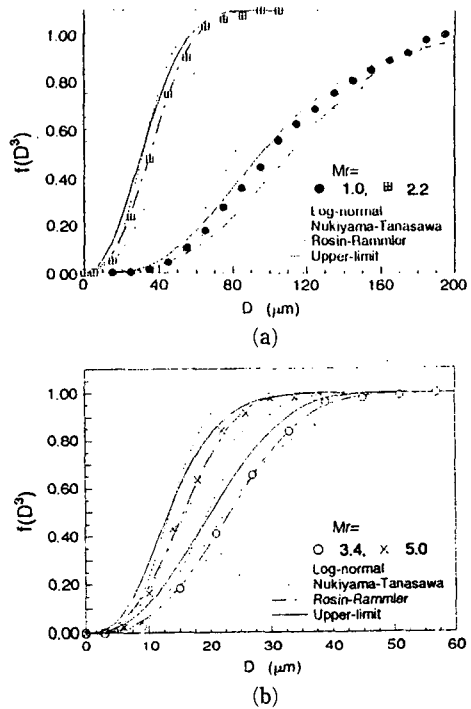


Fig. 8 Comparison between distribution functions on cumulative volume fraction

여기서,  $D_{CM}$ 와  $S_c$ 는 각각 기하학적 평균직경과 기하학적 표준편차를 나타낸다.

Nukiyama-Tanasawa 분포함수 :

$$f(D) = aD^2 \exp[-(bD)^q] \quad (2)$$

여기서,  $a, b, q$ 는 경험적으로 얻어진다.

Rosin-Rammler 분포함수 :

$$1 - Q = \exp[-(D/X)^n] \quad (3)$$

여기서,  $Q$ 는 전체 액적들의 체적에 대한 직경  $D$ 이하인 액적들의 체적에 해당하는 비율이며  $X$ 는 크기변수로서 누적체적분포의 63.2%에 해당하는 액적의 지름이다.

Upper-limit 분포함수 :

$$f(D^3) = \frac{D_m \cdot \delta}{D(D_m - D)\sqrt{\pi}} \exp\left[-\delta^2 \ln^2 \frac{aD}{D_m - D}\right] \quad (4)$$

Goering과 Smith<sup>(17)</sup>는 위의 식에 나타난 상수값들  $a, D_m, \delta$ 을 정리한 바 있다.

Fig. 8은 동일한 조건에 대하여 네가지 함수식들을 누적체적확률 데이터에 적용시켜 과연 어느 식이 데이터에 가장 잘 들어맞는지를 확인해본 결과

이다. 네가지의 질량비 조건에 대하여 Rosin-Rammler 분포함수의 경우는 원래의 데이터에 잘 일치되고 있는 반면에 Nukiyama-Tanasawa 분포함수는 심한 불일치를 보이고 있다. Log-normal 분포함수는 데이터에 따라서 일치여부에 있어서 일관성이 없어 보인다. Upper-limit 분포함수는 Rosin-Rammler 분포함수보다는 부정확하지만 데이터에 어느정도 일치하는 경향을 보이고 있다.

누적체적확률로 표시한 데이터에서 Nukiyama-Tanasawa 분포함수가 잘 들어맞지 않는 이유로는 이 식이 원래 수확률밀도를 고려해서 만든 식이기 때문이라고 여겨진다. 같은 관점에서 upper-limit 분포함수와 log-normal 분포함수도 누적형태(cumulative form)를 고려하지 않은 형태의 분포함수이기 때문에 누적체적확률을 고려해서 만들어진 Rosin-Rammler 분포함수보다는 부정확한 결과를 보이고 있는 것이라고 판단된다.

결국 연소분야에서 자주 사용되는 누적체적확률의 형태로서 분포함수를 적용하려면 Rosin-Rammler 분포함수가 가장 타당하겠고 upper-limit 분포함수와 log-normal 분포함수는 어느정도 만족도를 보이고는 있으나 데이터에 따른 변동이 심하다.

분포함수의 실험치에 대한 타당성을 검증하는 방법으로는 앞에서와 같이 직접적으로 액적크기분포에 대응시키는 방법이 있으며, 그 외에 측정에 의하여 얻어진 SMDm와 분포함수가 측정된 액적크기분포를 충분히 대표할 수 있다고 가정하였을 때 그 분포함수로부터 계산되어 예측되는 SMDp사이의 관계를 비교하는 방법이 있을 수 있다. 이와같은 관점에서 각각의 분포함수로부터 얻어지는 SMDp와 측정된 SMDm을 대응시키고  $SMDp = a + b \cdot SMDm$ 에 의한 곡선맞춤을 했을 때 얻어지는 계수와 표준오차(standard error)는 Table 1과 같다.

**Table 1** Parameters of predicted SMD equation curve fit

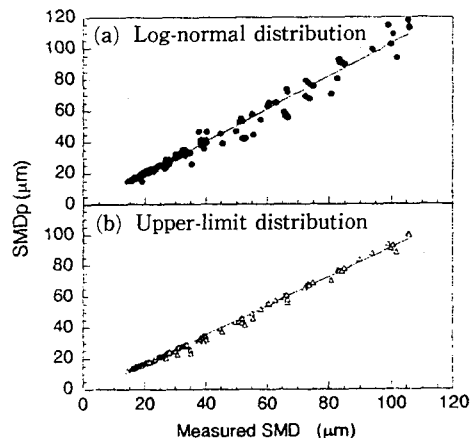
Distribution function	a	b	Standard error (%)
Log-normal	-1.3077	1.0436	8.6965
Nukiyama-Tanasawa	0.9275	0.7898	17.306
Rosin-Rammler	-3.9877	0.8994	13.131
Upper-limit	-2.5000	0.9414	5.4726

Table 1을 살펴보면 기울기가 1에 가까운, 즉, 예상치 SMDp와 측정치 SMDm가 일치하는 특성을 보이는 분포함수는 Log-normal 분포함수로 나타났으며, 표준오차가 가장 작은 것으로는 upper-limit 분포함수로 나타났다. Fig. 9는 이들 log-normal 분포함수와 upper-limit 분포함수로부터 얻어지는 SMDp와 실제 측정된 SMDm을 본 연구에서 수행한 130여개의 실험조건 전체에 대하여 나타낸 것이다.

Log-normal 분포함수에 의한 SMD는 데이터를 곡선맞춤한 선분(예상값과 측정값이 같게 나타낸 점선)에 아주 근접하는 양상을 보이고 있으나 데이터의 산포정도가 커서 액적크기가  $40 \mu m$  이하의 영역에 한해서만 신뢰성을 가지는 제약을 볼 수 있다.

반면에 upper-limit 분포함수에 의한 SMD 예상값은 측정값보다는 다소 작은 값을 가지는 경향이 있으나 데이터의 산포정도가 작아서 네가지 분포함수에 의한 SMD 예상값들 가운데 가장 우수한 경우라고 판단된다. 그의 Nukiyama-Tanasawa 분포함수와 Rosin-Rammler 분포함수로부터 얻어지는 SMD분포는 정확도에서는 log-normal 분포함수보다, 그리고 정밀도에서는 upper-limit 분포함수보다 측정값에 접근하는 정도가 낮다.

분무액적의 크기를 질량비와 유동장내의 위치에 따라 분석하는데 많이 사용되고 있는 것이 평균직경이다. 일반적으로 평균직경은 다음과 같이 정의되며, 정수  $j, k$ 에 따라 산술 평균직경( $j=1, k=$



**Fig. 9** Comparison between predicted SMD and experimental data

0), 표면적 평균직경 ( $j=2, k=0$ ), 체적 평균직경 ( $j=3, k=0$ ), 체적표면적 평균직경 (SMD,  $j=3, k=2$ ) 등으로 나타낸다.

$$(D_{jk})^{j-k} = \frac{\int_0^\infty D^j f(D) dD}{\int_0^\infty D^k f(D) dD} \quad (5)$$

상기 관계식을 응용하여 유동축상의 임의의 위치들을 택하고 각 위치에서 질량비의 변화에 따른 SMD를 분석한 자료가 Fig. 10에 도시되어 있다. 이러한 분석자료들은 실제 활용기관에서 필요한 분무조건을 선정하는데 설계자료로 활용될 수 있다. 동일한 위치에서 계측한 SMD는 액체유량보다는 질량비의 증가에 따라 크게 감소하는 함수관계를 보이고 있다.

그림 (a)~(c)를 통하여 공통적인 현상중의 하나는 SMD가 15~40  $\mu\text{m}$  범위에 집중되어 있으며, 이를 충족하는 질량비의 범위는  $Mr=2.5\sim 4.0$ 으로 나타났다. 그림에서  $Mr=5.0$  이상이 되면 액체유량이 큰 경우에는 계측상의 어려움으로 자료가 충분히 제시되지 못하여 표면적으로는 모든 조건에서 완전히 동일한 SMD로 간주할 수 있으나, 이는 실험장치의 용량증가와 보완적인 자료의 획득을 통한 검증이 요구되는 영역이기도 하다. 그러나  $Mr=5.0$  이상에서는 질량비 증가에 따른 SMD의 감소율이 극히 작기 때문에 질량비의 증가로 SMD의 개선을 크게 기대할 수는 없을 것이다.

Fig. 11에서는 SMD의 변화를 질량비를 변화시키면서 유동축상의 각 위치에서 계측하여 도시한 것이다. 본 그림에서는  $Mr=1.0, 2.2, 3.4$ 의 질량비에 대하여 SMD를 상호 비교분석이 가능하도록 하였는데, 일정한 질량비에 대해서 액체질량을  $Q=0.03\sim 0.06$  (kg/min)로 변화시켜 공기와 액체의 공급량이 동시에 변화되어 동일한 노즐에서 발생시킬 수 있는 미립화의 조건을 분석할 수 있도록 하였다.

SMD의 변화는  $Mr=2.2$  이상에서 모든 액체의 공급질량에 대하여 급격하게 감소해가는 결과를 보여주고 있다. 이는 질량비의 증가에 따라 SMD의 감소현상이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 특히  $Mr=3.4$ 의 경우에는 SMD의 값이 액체공급질량에 관계없이 35  $\mu\text{m}$  이하로서 미립화가 활발히 이루어지는 것으로 나타났다. 또한 각기 다른 질량비에 따른 도표에서 SMD의 축상의 분포는  $Mr=1.0$  경우의

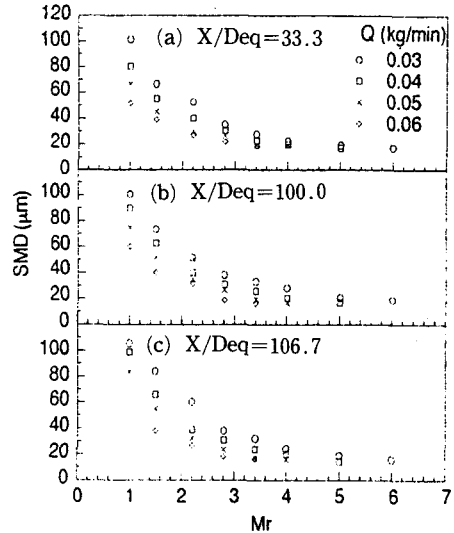


Fig. 10 Profiles of SMD vs. mass ratio with the variations of liquid flow rates

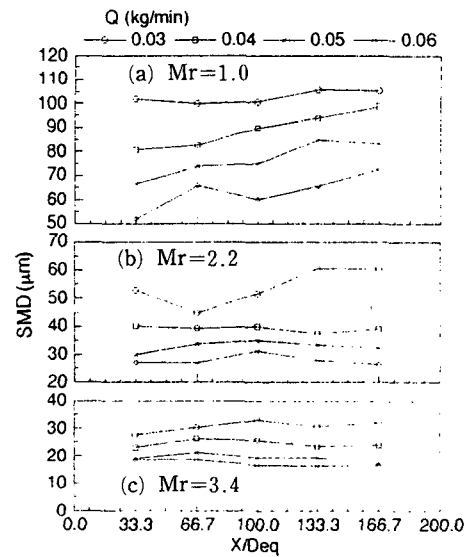


Fig. 11 Variations of SMD along the axial distance depending upon the mass ratio

낮은 액체공급질량의 경우를 제외하고는 노즐 출구에서 멀어짐에 따라 뚜렷한 값의 차이를 보이지 않는 결과를 보이고 있으며, 각 액체공급질량의 차이에 대한 SMD값의 차이도 질량비가 증가함에 따라 감소 현상을 보여 주고 있다.

SMD의 분포와 질량비의 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 각 도표의 경우 질량비는 다양하게 변화시

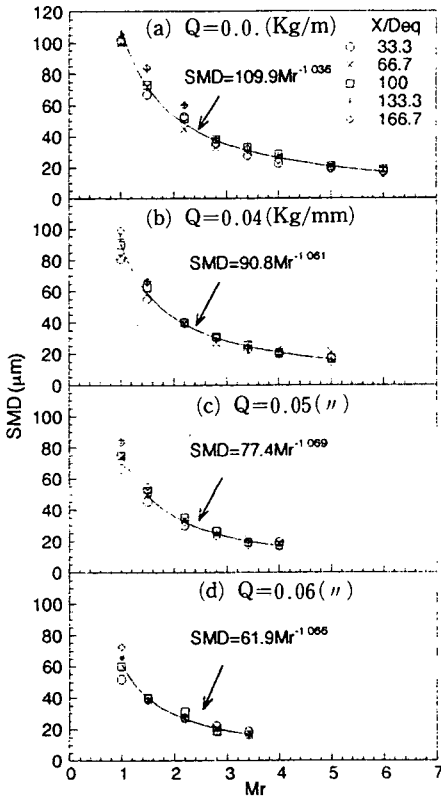


Fig. 12 SMD variations as a function of mass ratio

켰으나 두 유체중 액체의 공급유량은 고정하였으며 공기의 공급량을 점진적으로 증가시켜 질량비가 증가되도록 하였다.

그림에는 각 측정위치에서 질량비를  $Mr=1.0$ 에서부터 최대  $Mr=6.0$ 까지 변화시키면서 미립화된 액적의 크기를 측정하여 계산된 SMD의 분포가 도시되었으며, 모든 경우 입경은 질량비의 증가에 따라 크게 감소하는 양상이 뚜렷이 나타나 있다.

액체의 공급량이 증가할수록 최대 질량비가 적은 범위에서 데이터가 제시된 것은 본 실험장치에 설치된 공기 압축기의 용량 한계로 그 이상의 질량비를 얻을 수 있는 공기공급이 불가능했기 때문이다. 동일한 질량비의 경우에 액체의 공급량이 적을수록 입자의 SMD는 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 액체의 공급량이 적은 경우 공기의 공급량도 상대적으로 감소하게 되므로, 결국 적은 공기량의 분사류 충돌로서 액체를 미립화할 수 있는 난류운동에너지의 발생이 미약한데에 기인되는 것으로 본다.

그림의 네가지 어느 경우이나 아주 작은 SMD의

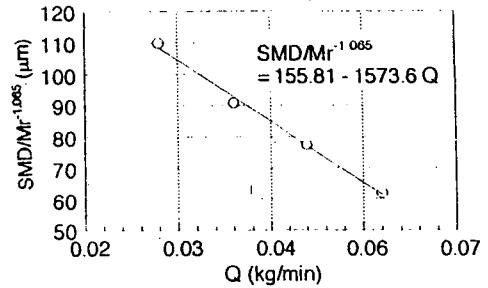


Fig. 13 Definition of experimental constant for liquid supply quantity

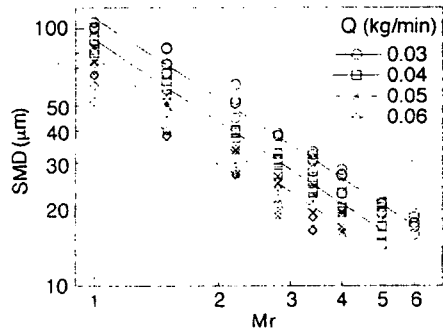


Fig. 14 Logarithmic correlation between SMD and mass ratio with Q

값을 나타내는 질량비인  $Mr=3.4$  경우를 정량적으로 분석해 보면,  $Q=0.03$ (kg/min)일 때 약  $30\ \mu\text{m}$ ,  $Q=0.04$ (kg/min)일 때 약  $25\ \mu\text{m}$ ,  $Q=0.05$ (kg/min)일 때 약  $20\ \mu\text{m}$ ,  $Q=0.06$ (kg/min)일 때 약  $17\ \mu\text{m}$ 으로 액체공급량의 증가에 따라 SMD의 값이 점진적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 기술한 내용을 바꾸어 설명하면 액체공급량이 증가하면 공기의 공급량이 증가하여 두 유체의 증가된 충돌분사속도에 의한 난류운동에너지가 증가하게 되므로 미립화의 성능이 보다 향상되는 현상으로 볼 수 있다.

이와 같이 질량비  $Mr$ 은 액체의 공급량  $Q$ 의 변화에 따라 변하게 되므로 SMD는  $Q$ 와  $Mr$ 에 지배되고 있다. Fig. 12에서 보여주고 있는 SMD와  $Mr$ 의 관계식들은 각 액체공급량  $Q$ 에 따라 각기 다른 곡선의 기울기와 상수값들을 가지고 있어 곡선의 식에 나타난 상수와  $Q$ 의 관계를 Fig. 13에 도시하였다. 비록 네가지의 유량에 대한 상수의 변화를 도시하였으나 상호관계로부터 선형적인 1차식을 구



할 수 있으며 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 네가지의 경우에서 곡선의 기울기를 평균하여 그 값을  $-1.065$ 로 택하고 SMD를  $Q$ 와  $Mr$ 의 함수 관계식으로 구하면 다음과 같다.

$$SMD/Mr^{-1.065} = 155.81 - 1573.56 \cdot Q \quad (6)$$

Fig. 14는 식(6)을 적용하여 대수그림에 네가지 액체공급량에 대하여 실험결과와 함께 도시한 예시도이며, 임의의  $Q$ 값에 대하여  $Mr$ 의 변화에 따른 SMD를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

동축노즐을 이용한 액막형 2상 분무의 미립화 특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같이 결론을 얻었다.

SMD의 분포양상을 질량비의 변화, 유동축방향의 거리를 변수로 하여 계측분석한 결과 실용기관에서 가장 많이 요구되는  $SMD = 15 \sim 40 \mu m$ 의 값은  $Mr = 2.5 \sim 4.0$ 의 범위로 밝혀졌다. 이 질량비의 범위에서 노즐로부터의 거리에는 거의 지배되지 않는 것으로 나타났다.

입자들의 크기분포를 실험데이터들의 분포현상을 반 실험식으로 제시되어 있는 log-normal 분포함수, Nukiyama-Tanasawa 분포함수, Rosin-Rammler 분포함수, upper-limit 분포함수 등과 비교 분석한 결과, 전체적으로 실험데이터와 잘 일치하는 분포함수로서는 누적체적확률로 표시되는 Rosin-Rammler 분포함수로 나타났다.

실측된 SMD와 분포함수로부터 얻어진 SMD를 비교 분석한 결과는 upper-limit 분포함수에 의한 SMD와의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다.

SMD의 변화는 질량비와 액체유량에 절대적으로 지배되며, 이의 실험적 함수관계 식은 다음과 같이 얻어졌다.

$$SMD/Mr^{-1.065} = 155.81 - 1573.56 \cdot Q$$

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원한 일반 기초연구사업(KOSEF 921-0300-0190-3)에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Zanelli, S., 1988, "Behaviour of a Liquid Jet near the Nozzle," *ICLASS-88*, pp. 1~14.
- (2) Ohtani, S., 1988, "Study on Development of Pneumatic Type Liquid Atomizers," *ICLASS-88*, pp. 15~23.
- (3) Tabata, M., Arai, M. and Hiroyasu, H., 1988, "The Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray in an Elevated Pressure Environment," *ICLASS-88*, pp. 405~410.
- (4) Pindolia, H. J. and Jasuja, A. K., 1988, "Effect of Injector Geometry upon the Performance of a Plane-Jet Airblast Atomizer," *ICLASS-88*, pp. 257~262.
- (5) Saito, A., Kawamura, K. and Tanasawa, Y., 1988, "Improvement of Fuel Atomization in Electronic Fuel Injection by Air Flow," *ICLASS-88*, pp. 263~270.
- (6) Ohnishi, N. and Ikeuchi, H., 1988, "The Development of Impinging-Jet Atomizing Nozzle of Two-Phase Type," *ICLASS-88*, pp. 57~63.
- (7) Bachalo, W. D., Rudoff, R. and Houser, M. J., 1987, "Laser Velocimetry in Turbulent Flow Fields Particle Response," *AIAA 25th Aerospace Science Meeting*.
- (8) Blümke, E., Eickhoff, H. and Hassa, C., 1988, "Dispersion of Monisized Droplets in a Turbulent Swirling Flow," *ICLASS-88*, pp. 89~96.
- (9) Mao, C. P., Oechsle, V. and Chigier, N., 1987, "Drop size Distribution and Air Velocity Measurements in Air Assist Swirl Atomizer Sprays," *Transactions of the ASME*, Vol. 109, pp. 64~69.
- (10) Nukiyama, S. and Tanasawa, Y., 1939, "Experiments on the Atomization of Liquids in an Air Stream; Report 3, On the Droplet-Size Distribution in an Atomized Jet," *SME Japan*, Vol. 5, No. 18, pp. 62~67.
- (11) Rosin, P. and Rammler, E., 1933, "The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal", *J. Inst. Fuel*, Vol. 7, No. 31, pp. 29~36.
- (12) 노병준, 강신재, 오제하, 1991, "LDV시스템에 의한 동축이상 분무의 난류혼합 유동특성 연구"

- 구,” 한국항공우주학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 22~33.
- (13) Rho, B. J., Kang, S. J. and Oh, J. H., 1992, “An Experimental Investigation on the Atomizing Turbulent Characteristics of a Two-Phase Coaxial Parallel Jet,” *The Fifth Asian Congress of Fluid Mechanics*, Vol. 1, pp. 591~594.
- (14) 노병준, 강신재, 오제하, 1992, “액주형 동축 노즐 분무의 부화특성에 관한 실험적 연구,” *자동차공학회지*, Vol. 14, No. 5, pp. 41~53
- (15) Rho, B. J., Kang, S. J. and Oh, J. H., 1993, “LDV Measurements of Turbulence Characteristics in a Two-Phase Coaxial Jet,” *2nd International Symposium on Engineering Turbulence Modelling, Engineering Turbulence Modelling and Experiments 2*, Elsevier Co., pp. 437~446
- (16) Xu, T. H., Durst, F. and Tropea, C., 1991, “The Three-Parameter Log-Hyperbolic Distribution and its Application to Particle Sizing,” *ICLASS-91*, Gaithersburg, USA, pp. 315~324.
- (17) Goering, C. E. and Smith, D. B., 1978, “Equations for Droplet Size Distributions in Sprays,” *Tran. of ASME*, pp. 209~216.