

〈論 文〉

## 액주형 이류체노즐의 반경반향 분무특성에 관한 연구

최진철\* · 노병준\*\* · 강신재\*\*\*

(1993년 8월 27일 접수)

### A Study on the Radial Spray Performance of a Plaintiff-Jet Twin-Fluid Nozzle

Jin-Chul Choi, Byung-Joon Rho and Shin-Jae Kang

**Key Words:** ALR(공기와 액체의 질량유량비), Mean Diameter(평균직경), Number Probability(수확률밀도), Drop Size Distribution(입자크기 분포), Cumulative Volume Fraction(누적체적분절), Flow Rate(유동량), Drop Size Range(입자크기 폭)

#### Abstract

In the combustion system, the optimum spray conditions reduce the pollutant emission of exhaust gas and enhance the fuel efficiency. The spray characteristics-the drop size, the drop velocity, the number density and the mass flux, become increasingly important in the design of combustor and in testifying numerical simulation of spray flow in the combustor. The purposes of this study are to clarify the spray characteristics of twin-fluid nozzle and to offer the data for combustor design and the numerical simulation of a spray flow. Spatial drop diameter was measured by immersion sampling method. The mean diameter, size distribution and uniformity of drop were analyzed with variations of air/liquid mass flow ratio. The results show that the SMD increases with the liquid supply flow rate and decreases with the air supply velocity. The radial distribution of SMD shows the larger drops can diffuse farther to the boundary of spray. And the drop size range is found to be wider close to the spray boundary where the maximum SMD locates.

#### 기 호 설 명

$ALR$ : 공기와 액체의 질량유량비(= $\dot{m}_{air}/\dot{m}_w$ )	$\dot{m}$ : 분당 공급되는 질량유량(kg/min)
$dD$ : 분포된 입자군의 특정 직경구간(= $10 \mu m$ )	$dN$ : 특정 직경구간 내에 존재하는 입자의 개수
$D$ : 입자직경	$N$ : 분포된 입자군의 총 개수
$D_{0.1}$ : 입자 누적체적이 총 체적의 10%일 때의 직경	$q$ : Rosin-Rammler 분포식의 쿨인도지수
$D_{0.5}$ : 입자 누적체적이 총 체적의 50%일 때의 직경(= $MMD$ )	$Q$ : 특정 직경이하의 누적체적분절
$D_{0.9}$ : 입자 누적체적이 총 체적의 90%일 때의 직경	$Q_r$ : 분포된 입자군의 총 체적
	$r$ : 노즐출구로부터의분무반경방향좌표축(cm)
	$SMD$ : 입자 총 체적과 총 표면적비
	$Span \ factor : D_{0.9} \sim D_{0.1}$
	$x$ : 노즐출구로부터의 분무 축방향 좌표축(cm)
	$X$ : 입자누적체적이 총 체적의 63.2%일 때의 직경(= $D_{0.632}$ )

\*정회원, 전북대학교 대학원

\*\*정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

\*\*\*정회원, 전북대학교 우주항공공학과

하첨자

air : 공기  
w : 물

1. 서 론

고압의 가스터빈 엔진에 널리 사용되고 있는 이류체노즐은 낮은 공기 압력으로도 미세한 미립화를 이룰 수 있으며, 액체분열에 이용된 공기가 연료와 잘 혼합되므로 연소시 발생하는 매연(soot) 및 배기스모크를 최소화할 수 있다.<sup>(1~3)</sup> 또한, 연료유동의 넓은 범위에서 상당히 균일한 입자를 얻을 수 있기 때문에 연소실 연소기체의 온도분포가 일정하여, 연소실 벽(liner wall)과 터빈 날개의 수명을 결정하는 열응력과 피로를 줄일 수 있다.<sup>(3)</sup> 그리고 압력식 노즐보다 액체가 분사되는 출구직경을 크게 할 수 있으므로, 탄소 퇴적물에 의해 발생하는 노즐의 막힘현상(plugging)이 일어날 가능성도 낮다. 이러한 장점때문에 연소기관에서 배출되는 오염물질의 규제가 강화되고 있는 현실정에 비추어 이류체노즐의 분무특성에 대한 관심이 증대되고 있다.

노즐에 의해 형성된 분무의 미립화 특성을 고찰하기 위해서는 분열된 입자의 평균크기 뿐만 아니라 분무의 국부적 위치의 크기 분포를 해석할 필요가 있다. 예컨대 평균직경이 같은 분무일 지라도 입자의 분포에 있어서 작은 입자들이 많은 분무의 경우 조기점화를 이룰 수 있으며, 분열된 입자의 크기가 균일한 분무의 경우에는 입자증발의 최종시간이 짧아지므로 미연되는 입자를 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup>

최근 진행된 이류체노즐의 분무특성에 관한 연구 내용으로, Care<sup>(5)</sup>는 인공기상학 로켓엔진의 동축 이류체노즐에 의해 형성된 분무의 평균 입자직경, 초기 분무각, 분무길이 등을 측정하였다. Ingebo<sup>(6)</sup>는 로켓엔진 내에 분사되는 질소액주의 분열된 입자직경을 광산란법에 의해 측정하여 계산된 평균직경을 공급기체 질량유량의 함수로 표현한 바 있다. 또한, 분무내 일부지점에서 측정된 평균직경으로 분무의 미립화 특성이 분석된 바 있으나,<sup>(7~11)</sup> 분무 반경방향의 입자분포 특성에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이류체노즐의 일종인 액주

형 이류체노즐에 의해 형성된 반경방향 분무특성을 고찰하기 위해 공급되는 액체 및 기체의 질량유량 변화에 따른 분열된 입자의 크기를 측정하였으며, 입자군의 평균직경, 분무내 각 지점에서의 수확물 밀도 및 입자직경의 분포폭을 분석하여 분무특성을 규명하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 노즐의 구조이다. 액체에 노출되는 부분의 부식을 억제하기 위해 스테인레스강으로 노즐을 제작하였다. 액체 공급부의 직경이 1.2 mm이며, 액주 외부의 기체막은 내경이 4 mm, 외경이 5 mm이다. 따라서 노즐출구의 공급되는 유체 평균속도는 유체공급량과 노즐출구 단면적으로부터 구해지게 된다. Fig. 2는 연속적인 분

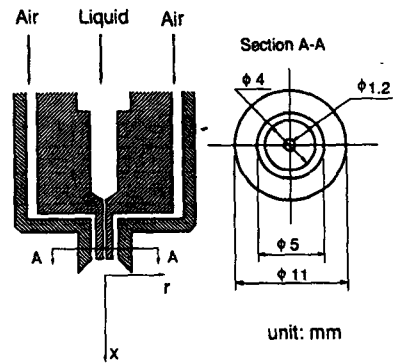
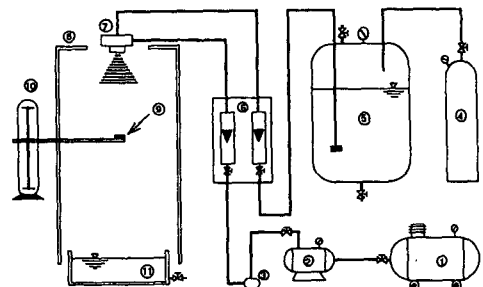


Fig. 1 Structure of a plain-jett win-fluid nozzle



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

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

무의 형성을 위해 구성한 실험장치도 보여주고 있다. 기체를 공급하기 위해 상용 컴프레서( $p_{\max}=20$  atm)를 이용하였으며 왕복피스톤에 의해 발생하는 기체유동의 맥동현상을 억제하고 유동을 안정화시키기 위해 압력제어 탱크를 설치하였다. 또한 고압의 기체에서 응축에 의해 발생된 수증기는 공기여과기에서 걸러진다. 분무특성을 지배하는 가장 중요한 인자인 공급되는 기체의 유동량을 미세하게 조절하기 위해 여러개의 유량계(유동량 범위: 50~200 l/min, 0~10 l/min, 0~40 l/min 각 1개)로 공급량을 제어하였으며, 액체공급은 고압탱크( $p_{\max}=150$  atm)에 충전되어 있는 무발화성 기체인 질소가 액체탱크에 압력을 가함으로써 이루어진다.

유동하는 입자의 채집은 액침법(immersion sampling method)을 이용하였다. 분열된 입자군은 입자 채집장치 내에 놓인 유리면 위의 오일(점도 1000 cS, 밀도 985 kg/m<sup>3</sup>인 실리콘 오일)면 상에 붙게 되며 오일면 위에 고정된 입자의 직경은 영상처리기법에 의해 측정되어졌다. Fig. 3은 입자크기 측정을 위한 영상처리시스템이며, 현미경(Parco ORION), 일반 카메라, CCD 카메라(SONY model CCD-F70), A/D 변환기(data translation, model DT2853), 마이크로컴퓨터(32 bit, 4 Mbyte RAM, 20 MHz) 등으로 구성되어 있다. 채취된 오일면상의 입자는 현미경에 의해 확대되며 512×512의 화소를 갖는 CCD 카메라가 분포된 입자의 영상을 포착하게 된다. 이때, 카메라로부터 들어오는 전기적 신호는 8-Bit A/D 변환기에 의하여 256 단계의 명암차로 이루어진 디지털 영상으로 바뀌어지게 되는데, 이 영상을 처리할 경우 차지하는 메모리가 상당히 크기 때문에 한 영상을 처리하는 시간이 길어지므로 적절한 기준값(threshold level)에 의해서 두값만을 갖는 2진 영상(binary image)으로 필터링하여 영상처리시간을 가능한 짧게 하였다. 따라서 직경의 측정과정에서 소요되는 총 시간이 단축되어, 입자증발에 의한 입경오차를 3% 이내로 할

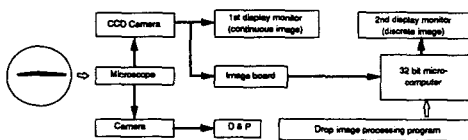


Fig. 3 Schematic diagram of image processing system for measuring drop size

수 있었다. 입자인식 알고리즘은 서로 겹치거나 타원인 입자의 계측을 배제하며, 진원인 입자만이 차지하고 있는 화소수를 인식한다. 이 인식된 화소수에 현미경 대물대에 부착된 자에 의해 환산된 화소당 길이를 곱함으로써 입자의 실제직경이 계산된다. 이때 각 화소당 공간적 해상도는 현미경의 배율에 의해 결정되므로 직경이 작은 입자의 계측시에는 현미경의 배율을 높여줌으로써 작은 입자도 큰 오차없이 계산될 수 있다.

### 3. 실험조건 및 실험범위

실험이 수행되는 동안의 실내공기를 온도 20°C, 습도 70%로 일정하게 유지하였으며, 노즐에 공급되는 액체는 물이고, 이를 분열시키기 위한 기체는 공기를 이용하였다. 공급되는 물의 질량유량은 0.03, 0.04, 0.05, 0.06 kg/min이었으며 공기와 물의 질량유량비(ALR)=1.0, 1.5, 2.2, 2.8, 3.4, 4, 5, 6이 되도록 공기의 공급유량을 조절하였다. 이때 공급유체의 물성치와 노즐출구에서의 유동조건은 Table 1과 같다.

본 실험의 측정위치를 표시하기 위해 Fig. 1에서와 같이 노즐 하류방향을  $x$ 축, 반경방향을  $r$ 축으로 설정하였으며, 이때 좌표의 원점은 노즐출구이다. 모든 유동조건에서  $x$ 축으로는 액체의 분열이 완전히 이루어진  $x=10, 20, 30, 40, 50$  cm 위치에서, 반경방향으로는 상류와 하류의 분무폭이 다르기 때문에 분무외곽부까지의 구간을 5~6등분한 위치에서 입자의 크기를 측정하였다.

Table 1 Ranges of nozzle exit flow parameters

Parameter	Fluid	
	Water	Air
Temperature(°C)	18±1.5	20±2
Density(kg/m <sup>3</sup> )	998.6	1.204
Viscosity(N·s/m <sup>2</sup> )	10.1×10 <sup>-4</sup>	1.82×10 <sup>-5</sup>
Surface tension(N/m)	0.073	—
Mass flow rate(kg/min)	0.03~0.06	0.03~0.204
Flow rate(l/min)	0.03~0.06	24.9~169
Velocity range(m/s)	0.44~0.88	50~390
Reynolds number	—	9,923~77,400

### 4. 실험결과 및 고찰

분열이 완전히 이루어진 이후, 입자가 하류로 유동해 감에 따라 변하는 평균 직경을 Fig. 4에 도시하였다. 이때 공급된 액체의 질량유량은 일정( $m_w = 0.03 \text{ kg/min}$ )하다. 그림에서 볼 수 있듯이 ALR의 값에 따라 분무 축방향 SMD분포 양상이 다르게 나타나고 있다. ALR=1.0, 1.5에서 하류 방향으로 갈수록 SMD가 점점 증가하고 있으며 위의 ALR을 제외한 경우에는 축방향에 따른 변동이 크지 않다. 따라서 저속의 공급기체속도(낮은 ALR)에서는 하류로 갈수록 합착에 의해 입자군의 직경이 증가하나, ALR이 큰 경우(고속의 공급기체속도) 입자 표면적에서 일어나는 증발에 의한 직경 감소량과 합착에 의한 증가량이 거의 같음을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 본 실험에서 측정한 입자 평균직경과 다른 구조의 액주형 이류체노즐의 평균직경 비교도이다. 이때 Jasuja<sup>(9)</sup>와 Lorenzetto-Lefebvre<sup>(10)</sup>이 실험할 당시의 유동조건은 Table 2와 같으며, 노

즐 내부의 형상과 액주의 직경 및 공기의 분출형식이 다소 차이가 있다. (ref (9, 10) 참조) 그림의 직선들은 실험으로부터 구한 SMD 표현식<sup>(9,10)</sup>을 본 실험조건에 적용하여 구한 값이며, 이 표현식들은 분무내 위치 및 노즐의 구조에 의한 영향이 고려되지 않은 식이다. 실험조건은 액체공급량이 0.03 kg/min, 액체의 밀도가 998 kg/m<sup>3</sup>, ALR=1~6이다. 그림에서와 같이 ALR에 따른 SMD의 변화 양상이 유사하나 전반적으로 Lorenzetto-Lefebvre의 분포값과 비슷하게 분포하고 있다. 따라서 이류체 노즐의 구조에 관계없이 ALR에 따른 평균직경 기울기가 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6은 ALR의 변화가 평균입경의 반경방향 분포에 미치는 양상을 보이고 있다. 이때  $x=10 \text{ cm}$ 이며, 공급되는 액체의 유량은 0.03 kg/min으로 일정한 경우이다. 그림에서 볼 수 있듯이 ALR에 따른 SMD 분포양상이 다르게 나타나고 있다. 낮은 ALR일 수록 반경방향에 따른 SMD가 커지고 있다. 반면 높은 ALR에서는 분분단면의 SMD가 거의 같은 값을 갖고 있다. 따라서 낮은 ALR

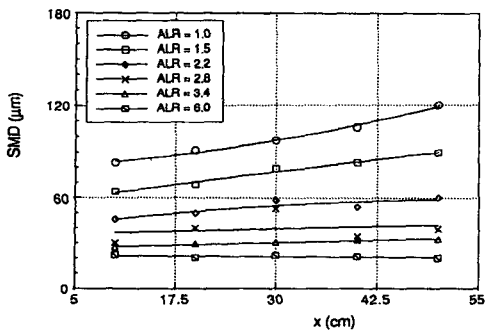


Fig. 4 Variations of mean drop size on the center line ( $m_w = 0.03 \text{ kg/min}$ )

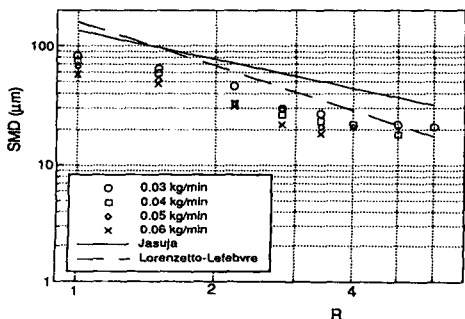


Fig. 5 Comparison with other nozzle

Table 2 Comparison of test conditions in other experiment

	Jasuja	Lorenzetto-Lefebvre	This experiment
Nozzle type	Plain-jet(swirl)	Plain-jet	Plain-jet
Range of air velocity(m/s)	70~135	~180	58~360
Mass ratio	2~8	1~10	1~6
Measurement method	Light-scattering	Light-scattering	Immersion sampling

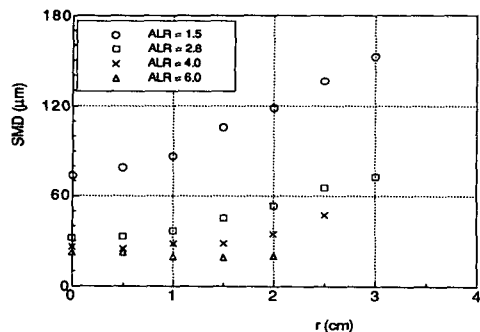


Fig. 6 SMD variation with radial distance

에서는 액체분열을 유발하는 공기의 분열에너지가 충분치 못하여 분열이 완전히 이루어지지 못한 큰 입자들이 분무외곽으로 확산해 감에 따라 큰 직경의 입자가 분무외곽에 많이 존재함을 의미한다. 한편으로 높은 ALR에서는 입자의 분열이 완전히 이루어져 분무단면에 분포된 입자군의 직경이 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 7은 공급 액체유량의 변화에 따른 반경방향 분열정도를 나타내고 있다. 이때 공급기체속도는 130 m/s, 축방향 측정위치는  $x=10$  cm이다. 액체 질량유량에 관계없이 분무외곽으로 갈수록 SMD가 증가하고 있다. 따라서 본 실험조건에서 액체의 질량유량에 무관하게 분무 반경방향 입자군의 분포양상이 유사함을 알 수 있다. 또한 액체 질량유량이 증가할수록 SMD가 작게 분포되어 있다. 따라서 액체의 분열을 유발하는 공기의 분열에너지가 같은 유동조건이기 때문에 액체질량당 공기의 분열에너지는 액체 질량유량이 많을수록 작아짐을 알 수 있다.

공급기체의 속도변화에 따른 액체의 분열정도를

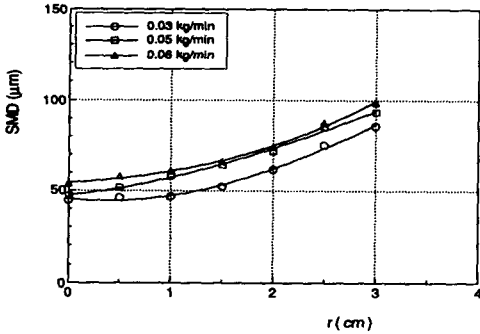


Fig. 7 SMD variation with radial distance for various liquid mass flow rate

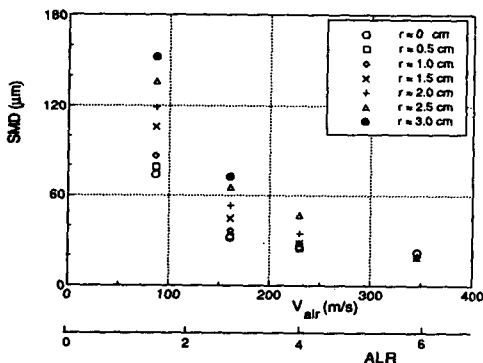
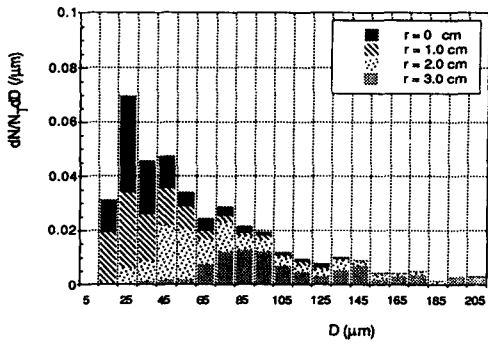


Fig. 8 SMD variation with air supply velocity

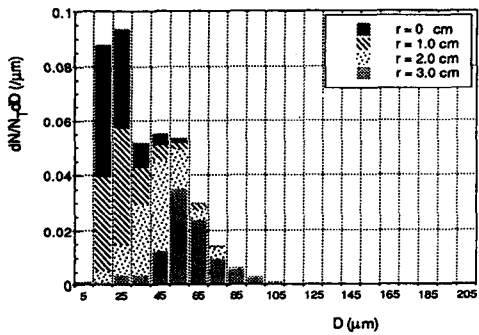
알아보기 위해 Fig. 8에 SMD의 변화양상을 도시하였다. 이때 실험조건은 Fig. 7과 같다. 전 반경방향에 대해 기체의 속도가 빠를수록 분열된 입자의 평균직경이 급격히 감소하고 있으며,  $ALR \approx 4$  이후에서는 SMD 감소율이 상당히 작아짐을 보이고 있다. 또한 분무의 중심보다는 분무 외곽부로 갈수록 공급기체속도에 따른 SMD 감소율이 더 크게 나타나고 있다. 결국 노즐의 액체와 기체 공급 직경을 설계하는데 있어서 ALR의 적절한 범위가 존재함을 의미한다. 즉,  $ALR \approx 4$  이전에서는 공기의 공급량을 많게 하거나 액체의 공급량을 적게 할 경우에 분열의 효과는 상당히 큼. 반면,  $ALR \approx 4$  이후에는 ALR 증가에 따른 분열효과가 거의 나타나지 않아 이류체노즐의 액체분열 한계성을 보이고 있다. 따라서 더 미세한 액체분열을 위해서는 분열 메카니즘이 다른 노즐의 형태를 선택해야 한다.

Fig. 9는  $m_w=0.03$  kg/min,  $x=10$  cm에서 ALR (공급기체 속도) 크기에 따른 반경방향 수확률밀도 분포를 보이고 있다. Fig. 9(a)는  $ALR=15$  ( $V_{air}=87$  m/s)일 때이며, 분무외곽으로 갈수록 큰 입자들이 더 많이 존재하고 있다. 결국 주위기류를 뚫고 확산한 큰 입자들이 더 많음을 의미한다. 또한 분무중심이나 외곽에 관계없이 적으나 큰 입자들이 분포되어 있다. Fig. 9(b)는  $ALR=2.8$  ( $V_{air}=161$  m/s)로, 공급공기의 노즐출구 분출속도가 더 큰 경우의 반경방향 수확률밀도 분포이다. 기체속도 증가에 의해 분열이 촉진되어 모든 반경방향에서 Fig. 9(a)보다 분포된 입자의 직경이 작아질 뿐 아니라 분포폭도 좁아져 가는 양상을 보이고 있다. 그러나 이 조건에서도 분무외곽으로 갈수록 큰 입자들이 더 많이 존재하고 있다. Fig. 9(c)는 공급기체속도가 상당히 빠른  $V_{air}=230$  m/s ( $ALR=4.0$ )인 경우이다. 이전의 ALR 조건에서 분포된 입자의 직경보다 상당히 작으며 분무반경방향에 무관하게 분포된 직경의 크기가 유사하며 직경의 분포폭 또한 상당히 좁은, 균일한 입자분포를 보이고 있다. 따라서 위의 반경방향 수확률밀도 특성에서 살펴 보았듯이 ALR이 클수록 분포된 입자의 직경이 작아지며 분포폭도 더 좁아져 균일해진 입자분포를 보였다.

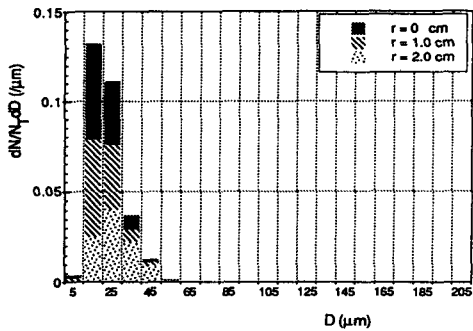
분포된 입자군의 누적체적을 Rosin-Rammler ( $R-R$ ) 분포식으로 표현하여 실험값의 정량화를 시도하였다. 이때  $R-R$  분포식은 아래와 같이 지수함수로 표현된다.



(a) ALR=1.5



(b) ALR=2.8



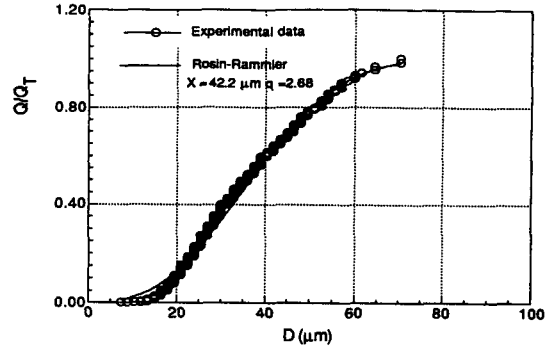
(c) ALR=4.0

Fig. 9 Drop number probability density with radial distance ( $\dot{m}_w=0.03$  kg/min,  $x=10$  cm)

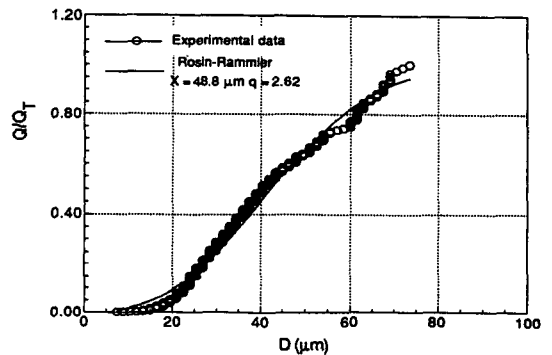
$$1 - Q = \exp - (D/X)^q \quad (1)$$

여기서,  $X$ 는 미립화정도,  $q$ 는 균일도 정도를 나타내는 정보로  $q$ 가 클수록 누적체적의 분절이 1에 빨리 수렴하게 된다.

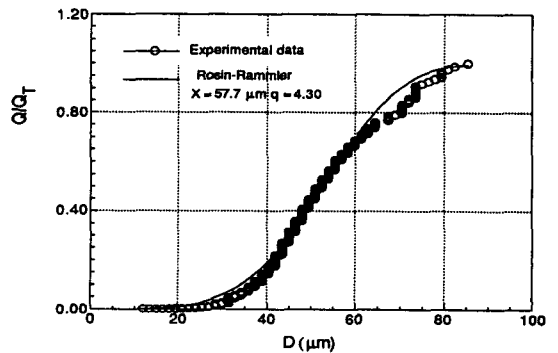
Fig. 10은  $m_w=0.03$  kg/min,  $ALR=2.8$ ,  $x=10$  cm에서 분포된 입자의 체적에 대한 누적분절이다. 전 반경방향에서 식(1)과 잘 일치하고 있다. 이 함수식에서 얻을 수 있는 정보인 분열정도 및 분포된



(a)  $r=0$  cm



(b)  $r=1$  cm



(c)  $r=2$  cm

Fig. 10 Cumulative volume fraction with radial distance ( $\dot{m}_w=0.03$  kg/min,  $x=10$  cm)

입자의 균일정도 지수 중 분열정도를 표현하는 체적직경  $X$ 는 감소하고 있어 Fig. 6과 Fig. 9에서도 보았듯이 분무외곽으로 갈수록 입자의 직경이 커지는 특성을 잘 나타내고 있다. 그러나, 균일도 정도를 나타내는  $q$ 는 일정한 양상을 보이지 못하고 있다.

Fig. 11은 질량유동이 0.03 kg/min,  $x=10$  cm인

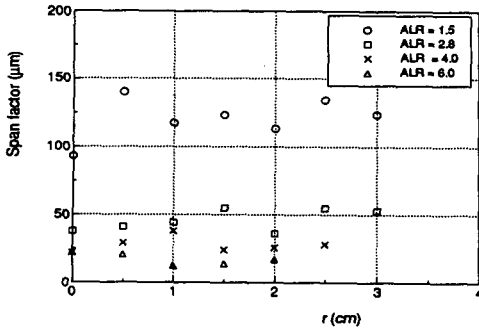


Fig. 11 Uniformity index of drop with radial distance

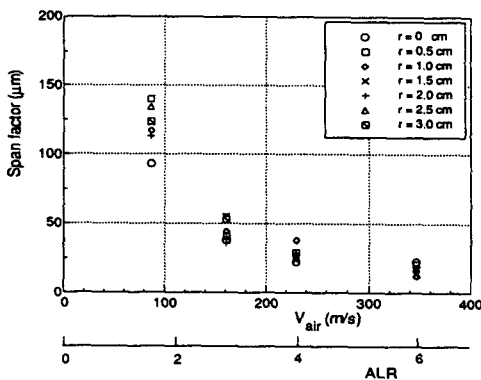


Fig. 12 Uniformity index of drop with air supply velocity

경우의 ALR 변화에 따른 반경방향 입자 분포폭을 보이고 있다. ALR이 클수록(공급기체속도가 빠를수록) 분포폭은 좁아지고 있다. 따라서 입자군의 평균직경 및 수확률밀도 분포양상에서도 보았듯이 분열에너지가 큰 유동조건(고속의 공급기체속도)에서 분열된 입자의 분포폭이 더 좁아짐을 알 수 있다.

기체속도변화에 따른 입자의 분포폭 특성을 Fig. 12에 도시하였다. 이때 실험조건은 Fig. 11과 같다. 분무의 중심부 뿐 아니라 외곽부에서도 공급기체속도가 증가함에 따라 균일도 정도를 나타내는 분포폭은 좁아지다가 점점 둔화되는 구간을 갖으며, ALR≈4 이후에서는 그다지 큰 변화를 보이지 않고 있다.

### 5. 결 론

동축 이류체노즐에 의해 분열된 입자군의 반경방

향 분무특성을 고찰한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 낮은 ALR일수록 분무 축방향 및 반경방향에 따른 SMD가 커지는 반면, 높은 ALR에서는 전 분무내의 SMD가 거의 같은 값을 갖고 있다.

(2) ALR≈4 이전에서는 공급기체의 노즐출구 평균속도가 빠를수록 분열된 입자의 평균직경이 급격히 감소하고 있으며, ALR≈4 이후에서는 SMD 감소율이 상당히 작게 나타났다. 또한, 분무의 중심보다는 분무 외곽부로 갈수록 공급기체속도에 따른 SMD 감소율이 더 크다.

(3) 낮은 ALR에서 분무 외곽으로 갈수록 큰 입자들이 더 많이 존재하는 반면, 높은 ALR에서는 분포된 입자의 직경이 작아질 뿐 아니라 분포폭도 좁아져 가는 양상을 보였다.

### 참고문헌

- (1) Lefebvre, A. H., 1980, "Airblast Atomization," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 6, pp. 233~261.
- (2) Inamura, T., Nagai, N. and Hirai, T., 1991, *A Study on Spray Flow Issued from Plain Jet Atomizer Using Phase/Doppler Particle Analyzer*, ICLASS-91.
- (3) Lefebvre, A. H., 1985, "Fuel Effects on Gas Turbine Combustion-Ignition, Stability, and Combustion Efficiency," *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 107, pp. 24~37.
- (4) Zhao, Y. H., Hou, M. and Chin, J. S., 1986, "Dropsizes Distributions from Swirl and Airblast Atomizers," *Atomization and Spray Technol.*, Vol. 2, pp. 3~15.
- (5) Care, I. and Ledoux, M., 1991, *Study of an Airblast Coaxial Atomizer-Experimentals and Modelisation*, ICLASS-91.
- (6) Ingbo, R. D., 1991, *Cryogenic Liquid-Jet Breakup in Two-Fluid Atomizers*, ICLASS-91.
- (7) Jasuja, A. K., 1982, "Plain-Jet Airblast Atomization of Alternative Liquid Petroleum Fuels under High Ambient Air Pressure Conditions," *ASME paper 82-GT-32*.
- (8) Ingebo, R. D., 1981, "Capillary and Acceleration Wave Breakup of Liquid Jets in Axial Flow Airstreams," *NASA Technical Paper 1791*.

- (9) Jasuja, A. K., 1979, "Atomization of Crude and Residual Fuel Oils," *ASME. Eng. Power*, Vol. 101, No. 2, pp. 250~258.
- (10) Rizkalla, A. and Lefebvre, A. H., 1975, "The Influence of Air and Liquid Properties on Air Blast Atomization," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 97, No. 3, pp. 316~320.