

〈논 문〉

외부혼합형 음속노즐을 사용한 2유체 미립화의 분무특성

박병규* · 이준식**

(1996년 7월 5일 접수)

Spray Characteristics of Twin-Fluid Atomization Using External-Mixing Sonic Nozzles

B. K. Park* and J. S. Lee**

Key Words : Twin-Fluid Atomization(2유체 미립화), Sonic Nozzle(음속노즐), Particle Size Measurement(입경측정), Tomography(토모그래피), Spray Characteristics(분무 특성)

Abstract

Spray characteristics of external-mixing sonic twin-fluid atomization nozzles are investigated experimentally. Particle sizes are measured by the Fraunhofer diffraction method using the Malvern particle analyzer, and their radial distributions are obtained using the tomographical transformation technique. The spatial distribution of SMD shows that the drop size increases in the radial direction at a fixed liquid flow rate, and the distribution is getting uniform rapidly as the atomizing gas pressure increases. The SMD decreases as the liquid flow rate increases at a fixed GLR. It is found that the atomization efficiency of the flush type sonic nozzle is superior to that of protrusion type. The effect of laser beam diameter of the particle analyzer on the spatial SMD distribution is minor at present experimental conditions.

기 호 설 명		OBS	
A	: 노즐의 유동단면적 (m^2)	: Malvern 입경분석기로 측정된 광소멸 (Obscuration)	
D_{10}	: 길이 평균직경 (μm)	P	: 가스의 절대압력 (Pa)
D_{32}	: Sauter 평균직경, SMD (μm)	p	: 가스의 상대압력 (Pa)
E	: 광소멸 (extinction)	p_{co}	: 액체공급관 출구압력
GLR	: 가스 질량유량과 액체 질량유량의 비	p_n	: 가스노즐 압력
h	: 노즐 오리피스스의 돌출길이 (mm)	Q	: Mie 산란이론으로 계산한 광소멸 효율
L	: 레이저빔의 광로길이 (m)	Q_L	: 액체의 체적유량 (ml/min)
\dot{m}_g	: 질량유량 (kg/s)	r	: 분무의 반경방향 좌표 (mm)
M	: Mach수	V_j	: j번째 환상링에서 가스에 대한 액체의 체적분율 (식 (2))
N_R	: 단면 재구성시 환상링의 수	V_j	: j번째 환상링의 체적 (m^3)
N_j	: j번째 환상링 내의 액적수	x	: 분무의 축방향 좌표 (mm)
		η	: 액적의 수 밀도

*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**회원, 서울대학교 기계공학과

첨자

- e : 노즐출구
 L : 액체
 t : 정채조건
 $*$: 노즐목

1. 서 론

액체를 분무미립화하는 것은 분무연소, 공정산업, 의약 및 식품산업 등 많은 산업공정분야에서 응용되고 있다. 공기제트를 사용한 미립화에 대해서는 많은 연구자들에 의해 정량적으로 연구되어 왔으며, 대부분이 공기유동의 Mach수가 0.3보다 낮은 아음속이었다. 출구 Mach수가 0.3을 넘으면 압축성의 영향을 무시할 수 없게 되고, 실제로 가스분사 분무기에서 가스의 공급압력이 종종 상당히 커서 단면축소 노즐의 출구에서 음속에 도달하며 노즐목에서 가스유동은 초킹된다.

Kim과 Marshall⁽¹⁾은 용융밀랍(molten wax)을 미립화하고 현미경으로 응고된 밀랍 입자들의 수를 세고, 크기를 측정하였다. Ranger와 Nicholls⁽²⁾는 슬리렌사진 가시화 방법을 사용하여 충격관내로 분사된 액적들의 분열을 관찰하였다. Lorenzetto와 Lefebvre⁽³⁾는 공기분사 미립화에 대한 여러 가지 인자들의 영향을 고찰하기 위해 광산란 방법을 사용하였다. Ünal⁽⁴⁾은 초음속분무노즐에서의 유동을 가시화하고 정량적인 분석을 하였으며 표본을 채집하여 Al 합금의 입경분포를 측정하였다. Kihm과 Chigier⁽⁵⁾는 2차원 평판형 공기분사노즐에서 미립화에 대한 충격파의 영향을 관찰하기 위해 광산란 방법을 사용하여 액적크기를 측정하였다. 평균 액적크기는 공기와 액체의 질량비, 상대속도의 증가에 따라 감소하고 음속조건에서 미립화한계에 도달함을 밝혔다.

정과 이⁽⁶⁾는 시판되고 있는 심플렉스형 와류분무노즐을 사용하여 제한된 공간내 분무의 유동특성 실험을 수행하였으며, 노 등⁽⁷⁾은 액주형 동축노즐 분무의 무화특성을 액침법을 이용한 영상처리기법으로 분석하였다.

본 연구의 목적은 단면축소 음속노즐로부터 분사되는 고속가스제트에 의한 분무특성을 고찰하는 것이다. 분무미립화와 관련된 인자들(분사가스압력, 액체유량, 액체공급관/노즐오리피스 돌출길이)을 각각 변화시킴으로써 미립화특성을 고찰하였다. 입

경측정장치를 사용하여 액적크기를 측정하고, 토모그래피변환기법을 이용하여 액적입경의 반경방향 분포와 평균직경을 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

고속으로 분사되는 가스는 충분한 유량과 압력을 유지할 수 있도록 Fig. 1과 같이 액체질소를 기화시켜 사용하였다. 수직하방으로 고속제트가 분사되도록 가스분사노즐을 설치하였으며, 액체유량과 분사가스유량을 독립적으로 변화시킬 수 있도록하기 위해 가변유량계를 설치하였다.

노즐형상은 Fig. 2와 같이 내경이 일정한 액체고속 공급관을 환상의 가스 유로가 둘러싸고 있는 구조로 되어 있다. 가스유로단면은 노즐오리피스 외벽과 가스노즐 하부 내벽을 직선형으로 설계, 제작하였다. 따라서 노즐의 출구단면적 A_e 는 노즐의 목단면적 A^* 와 같은 9.14mm^2 이고, 출구/목단면적비는 1.0이다. 가스 출구면으로부터 액체공급관의 돌출길이 h 는 노즐의 액체공급관 상부에 부착하는 부싱(bushing)의 높이를 변화시킴으로써 0~7mm로 조절할 수 있게 설계해서 제작하였다.

2.2 실험방법

고속가스제트가 분사노즐을 통하여 분사될 때 가스분사노즐 내부유동을 1차원 등엔트로피 유동으로 가정하면 음속노즐의 단위 단면적 당 가스 질량유량은 노즐단면에서의 가스물성치로써 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾ 음속노즐의 유동상태는 정채압력과 배압의 함수로서 가스의 질량유속은 정채압력 P_t 에 비례하며 단면축소노즐인 경우에 대하여 Fig. 3에 나타났다. 유동초킹이 시작되는 정채압력은 191.9 kPa이고 정채압력이 증가할 때 Mach수는 노즐목에서 가스유동이 초킹될 때 ($M_e=M^*=1$)까지 증가한다. 정채압력이 그 이상으로 증가하면 노즐목에서 Mach수는 1을 유지하지만 가스밀도는 압축에 의해 점점 증가하며 따라서 가스의 질량유속도 계속 증가한다.

압축성유동 이론에 따르면 가스의 단위면적 당 질량유량은 정채압력과 배압의 비에 의존한다. 분사질소가스의 정채압력을 측정하기 위하여 노즐 상부분체에 압력측정공을 내고 연결관을 분기하여 압력변환기(Validyne DP15TL, CD12 transducer

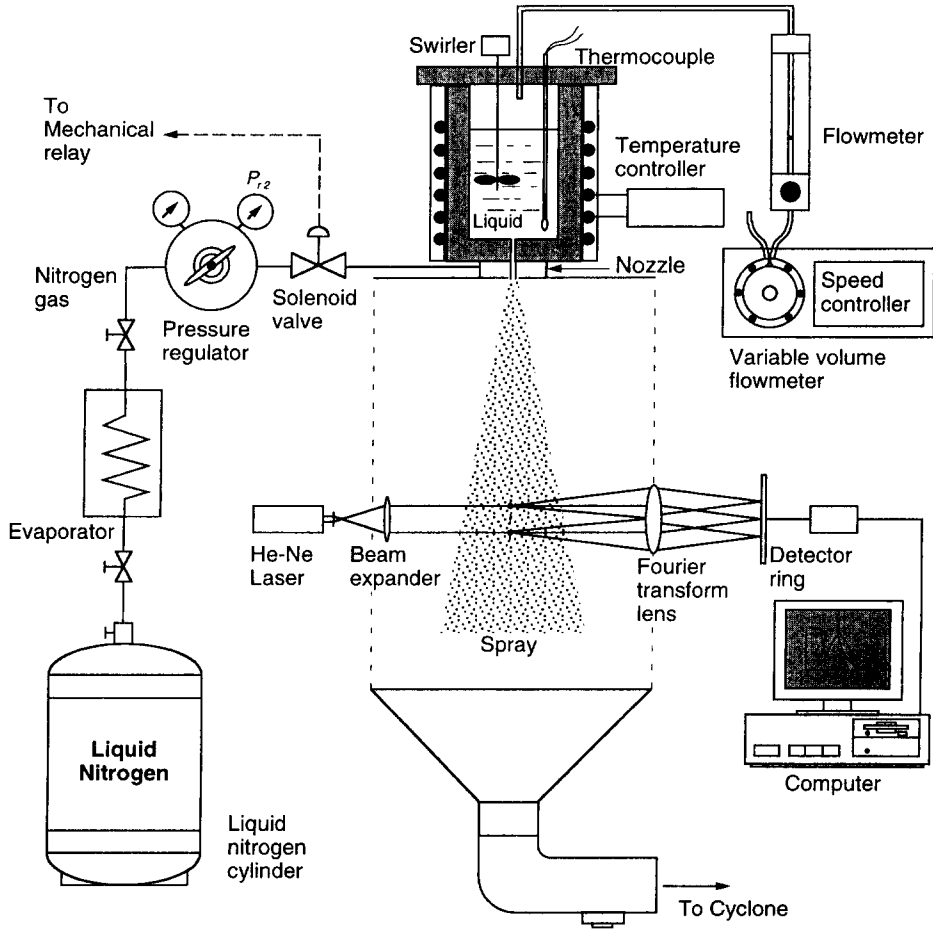


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

indicator)와 부رتون 압력계를 연결하였으며, 압력 변환기의 교정된 전압은 자료회독장치(HP3852A)의 적분전압기(integrating voltmeter HP44701A) 모듈을 거쳐 디지털 신호로 바뀐 후 PC로 송신된다. 질소가스분사압력이 실험결과에 미치는 영향의 중요성을 고려하여 PC에서는 그래픽으로 데이터 오차가 설정치의 $\pm 0.03\%$ 이하임을 확인하였다. 노즐내부의 온도와 압력은 HP3852A를 통하여 결과를 화일로 저장하며 압력변동을 감시하기 위해 압력신호는 디지털 메모리스크프로도 보내진다. 액체유량은 분사가스유량과 독립적으로 변화시킬 수 있도록 하기 위하여 가변 체적유량계(Cole-Parmer Ins., Masterflex)의 인가전압을 조정함으로써 유량을 변화시켰으며, 이때의 유량을 직렬로 연결된 측정용 유량계로 측정하였다.

2.3 액적크기 측정 및 공간분포

레이저회절 입자크기측정법의 기본원리는 입자의 직경이 증가함에 따라 회절된 빛의 산란각이 감소하는 Fraunhofer 회절이론을 이용한 것이다.⁽⁹⁾ 다른 직경의 입자들에 의한 산란광 에너지는 일련의 반원환 모양의 광 다이오드들에 의해 감지되며 반복법에 의해 크기분포함수로 바뀐다. 측정데이터의 분석에는 Rosin-Rammler 2인자 모델을 적용하였다.

측정기기는 표준 보정용 레티클(reticle)을 사용하여 실험 전후에 정확도를 확인하였다. 보통 50% 보다 큰 광소멸(obscuration)을 가진 밀한 분무의 경우, 레이저광의 다중산란에 의해 실제값보다 작은 평균액적크기가 측정된다. Rosin-Rammler의 두 분포인자들은 다중산란을 고려해서 Felton 등⁽¹⁰⁾

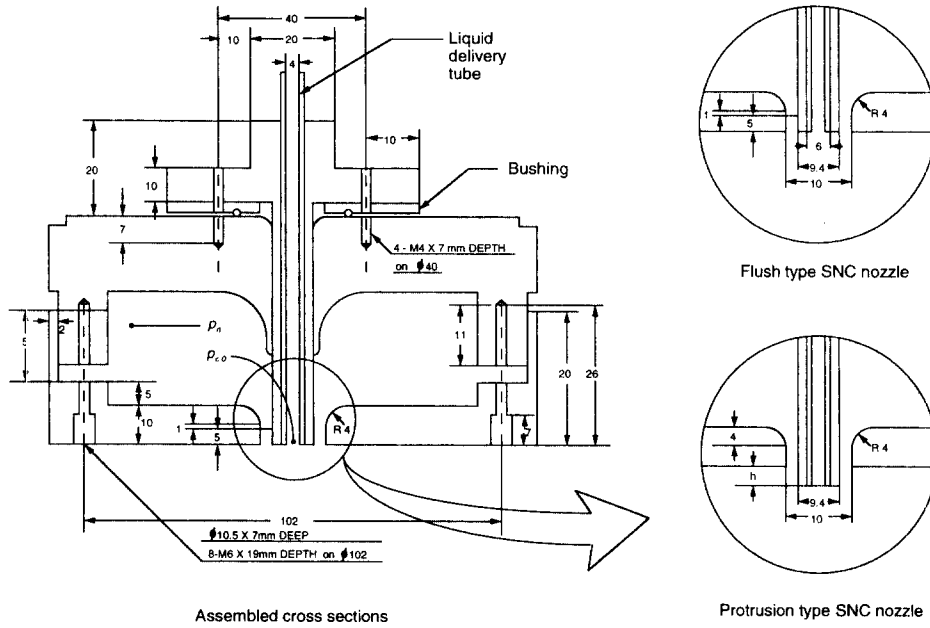


Fig. 2 Cross-sectional views of sonic (SNC) twinfluid atomization nozzles

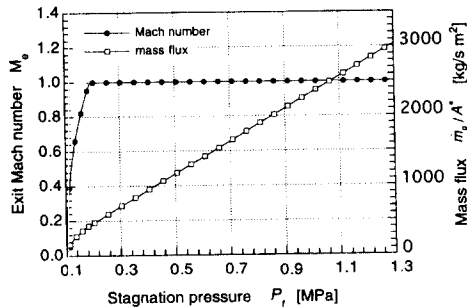


Fig. 3 Mass flux and nozzle exit Mach number of atomizing gas as a function of stagnation pressure in SNC nozzle.

에 의해 제시된 수정식을 사용하여 수정하였다.

경로적분된 실험데이터를 국소점 데이터로 변환하여 재구성하는 방법에는 onion peeling, Abel 변환, Fourier 변환 등이 있다. 이러한 토모그래피변환을 이용하면 측정변수의 공간분포를 얻을 수 있다. 분무에 의한 광소멸(extinction) E 는 다음 식으로 표시된다.⁽¹¹⁾

$$E = 1 - \exp\left(-\eta L \int_0^\infty \frac{\pi}{4} Q D^2 \frac{dn}{dD} dD\right) \quad (1)$$

여기서 η 는 액적 수 밀도, L 은 레이저빔 경로길

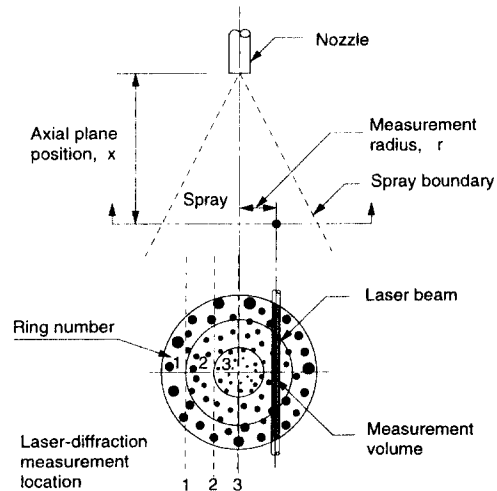


Fig. 4 Deconvolution ring and line-of-sight geometry.

이, Q 는 Mie 산란이론으로부터 계산된 광소멸효율(extinction efficiency), dn/dD 는 분무의 액적 직경 분포함수이다.

축대칭인 분무의 경우 공간분해(deconvolution) 과정은 Fig. 4와 같이 분무를 각도에 따른 변화 없이 반경에 따라 변하는 환상의 링들로 나누어 식 (1)을 차분화하고 정규화(normalization) 조건과 분

무의 여러 위치에서 얻은 관측선평균된 데이터를 이용하여 각각의 링에 대한 크기분포와 수밀도를 계산하였다. ^(11,12) 또한 분무밀도는 수밀도와 체적분율로써 계산되며 여기서 체적분율은 한 지점에서 액체에 의해 실제로 점유된 공간의 비율을 나타낸다. 분무 횡단면에서 j번째 링에 대한 체적분율 V_j 는 수밀도(N_j/V_j)로부터 다음과 같이 계산하였다.

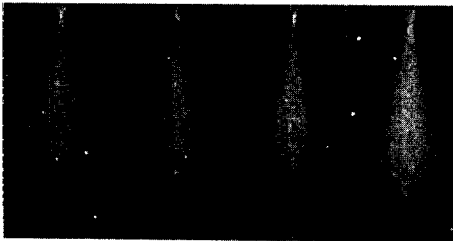
$$V_j = \frac{\pi D_{30,j}^3 (N_j/V_j)}{6} \quad (2)$$

전체 단면적에 대한 체적분율은 모든 링들에 대해 식 (2)를 합산하여 계산해야 한다. 그러나 이 전체 체적분율은 분무의 외부경계에 의존하므로 절대치보다는 상대적인 비교치로서 사용할 수 있다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서 사용한 액체는 물이고 노즐의 배압(back pressure)은 모든 실험조건에서 대기압이었다. 분무의 전체적인 형상을 관찰하기 위해서 출력 10 mW 헬륨-네온 레이저와 원통렌즈를 사용하여 레이저 평면광(laser sheet beam)을 만들고 정사진으로 가시화하여 Fig. 5에 나타냈다. 이 결과로부터 분무의 전체적인 대칭성 구조를 확인할 수 있었다.

관련된 인자들을 변화시켜가며 분무특성을 조사하기 위해 노즐출구에서 160mm 지점의 단면에 대해서는 분사가스 압력을 0.15~0.5 MPa, 액체유량을 100~300 ml/min 으로 변화시키면서 직경 9mm 레이저빔을 사용하여 분무중심축에서 반경방향 5 mm 간격으로 액적입경을 측정하였다. 분무의 공간분포특성을 고찰하기 위하여 측정자료는 Dodge



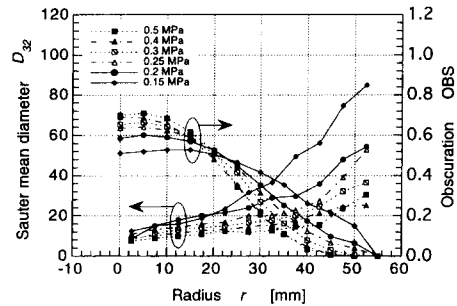
$p_n = 0.5 \text{ MPa}$ $p_n = 0.75 \text{ MPa}$ $p_n = 1.0 \text{ MPa}$ $p_n = 1.25 \text{ MPa}$

Fig. 5 Photographs of atomized water spray in protrusion type SNC nozzle using laser sheet beam.

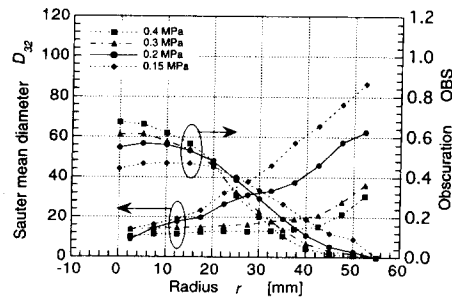
등⁽¹²⁾의 방법으로 공간분해하여 입경의 반경방향 분포와 단면평균 입경을 구하였다.

액체유량이 200 ml/min 이고, 분사가스 정체압력을 0.15~0.5 MPa 로 변화시켰을 때 노즐출구로부터 160mm 지점에서의 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 액적의 Sauter 평균직경(SMD)은 분사가스 정체압력이 낮은 경우 반경방향으로 뚜렷이 증가하며 이것은 분무의 경계근처에서 작은 액적들의 선택적인 증발, 상대적으로 작은 전단에너지 전달로 인한 미약한 미립화효과, 가스제트에 의한 액적군의 난류분산 등에 기인한다. 액적의 SMD 분포는 분사가스압력이 증가함에 따라 반경방향의 증가가 현저히 둔화되는 것으로 나타났다.

분사가스 정체압력이 낮은 경우 분무의 중앙부근에서는 광소멸이 거의 일정한 분포를 나타내고 반경방향으로 서서히 감소하지만, 정체압력이 증가함에 따라 분무의 중앙에서 크며 경계에서 감소하는 중 모양을 나타낸다. 노즐압력이 증가할수록 분무 단면의 전체적인 입경분포가 보다 균일해지고 입경이 작아져서 산란각이 커지기 때문에, 분무 중앙에



(a) Flush type SNC nozzle



(b) Protrusion type SNC nozzle

Fig. 6 Radial distributions of deconvoluted SMD and obscuration for various gas pressures in SNC nozzle.

서는 광소멸이 높지만 반경이 증가함에 따라 측정된 분부와 레이저 평행광이 교차하는 체적이 감소하고 가스에 대한 액체의 체적분율이 감소하기 때문에 광소멸이 급격히 감소한다.

SNC노즐의 출구에서 측거리 160mm 인 단면에서 가스/액체 질량비에 대한 분무단면평균 SMD변화를 액체유량에 따라 Fig. 7에 나타냈다. 액체유량을 일정하게 하면서 분사가스 압력 또는 질량유량을 증가시켰을 때 액체의 SMD는 가스/액체 비의 증가에 따라 급속히 감소한다. 이러한 SMD 감소는 단위 액체질량 당 환상제트의 분열에너지의 점차적인 증가에 따른 것이다. 가스/액체 질량비가 2를 초과함에 따라, SMD의 감소율은 현저하게 줄어들고 가스/액체 질량비가 5를 초과함에 따라 초크유동에 대한 거의 평탄한 영역은 미립화가 한계에 도달한 것을 의미한다. 즉 임계 Weber수에 도달하게 되어 SMD는 더 이상의 감소가 매우 힘들다. 그러나 동일한 가스/액체 질량비에서는 액체공급량이 많을수록 액적직경은 작아져서 미립화효율은 상승하며 이 결과는 평면 2차원 노즐의 결과와 일치한다⁽⁶⁾. 가스/액체 질량비를 일정하게 하면서 액체유량을 증가시키면 분사가스의 압력증가에 의한 밀도가중(density-weighted) 가스속도의 증가와 팽창과에 의한 유동방향의 변화로 인해 단위 액체 질량 당 운동량 전달이 증가하며 미립화효율이 증가하여 분무단면평균 SMD는 감소하게 된다. 정해진 노즐형태에서 분사가스의 정체압력은 노즐유동과 SMD를 결정하는 데 가장 지배적인 역할을 한다. 또한 SNC 노즐에서는 돌출길이가 4mm인 돌출형 노즐의 미립화효율이 평면형 노즐보다 떨어지

는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 함입형 노즐의 미립화효율이 평면형 노즐보다 떨어지는 현상과 유사하다.⁽¹³⁾

한편 노즐출구에서 70mm 지점의 단면에 대해서 직경 2mm와 9mm 레이저빔을 사용하여 분무중심축에서 반경방향으로 2 mm 간격으로 액적입경을 측정된 결과를 Fig. 8에 나타냈으며, 본 실험조건에서는 레이저빔 직경의 영향이 작은 것으로 나타났다. 이것은 분무의 반경방향 변화가 현저한 차이를 나타내지 않기 때문이라고 생각된다. 가스에 대한 액체의 체적분율 V_l 는 분무의 중심에서 조금 벗어난 곳에서 최대치를 나타냈으며, 분사가스 정체압력이 증가함에 따라 약간 분무중앙 쪽으로 이동하는 경향을 나타냈다. 이것은 분사가스의 압력 증가시 가스제트의 분무축방향 운동량 증가로 인한 입경분포 변화에 기인하는 것으로 생각된다.

높은 분사가스 압력에 의한 분무특성을 조사하기 위해 노즐출구에서 70mm 지점의 단면에 대해 액체유량을 200 ml/min, 분사가스 압력을 0.3~1.1

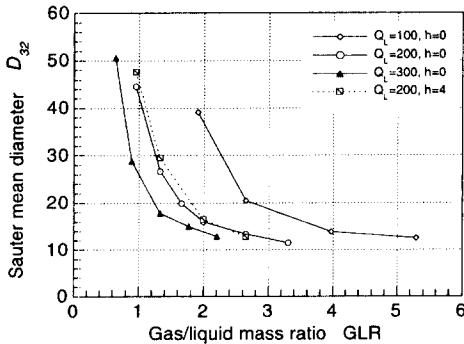


Fig. 7 Influence of gas/liquid ratio on cross-sectional-averaged drop size in SNC nozzles at axial distance $x=160$ mm

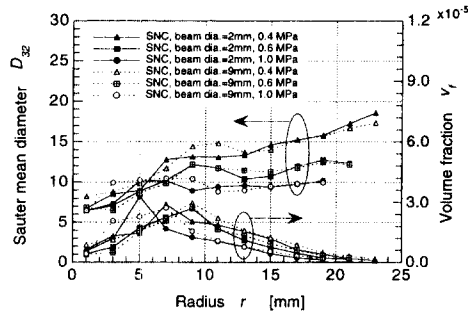


Fig. 8 Influence of laser beam diameter on drop size distribution in SNC nozzle

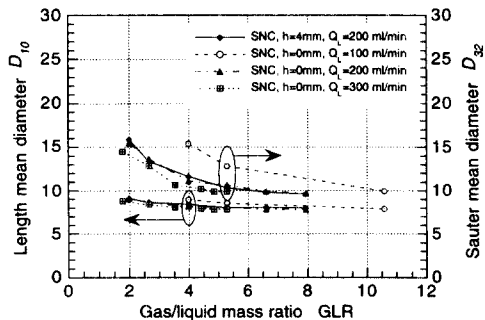
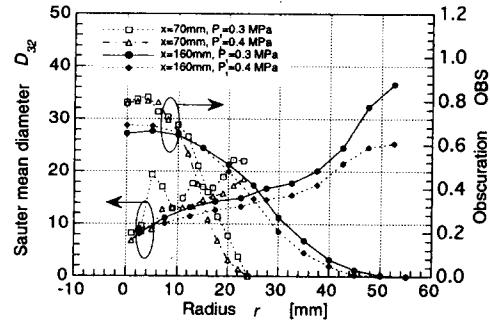


Fig. 9 Influence of gas/liquid ratio on cross-sectional-averaged drop size in SNC nozzle at axial distance $x=70$ mm

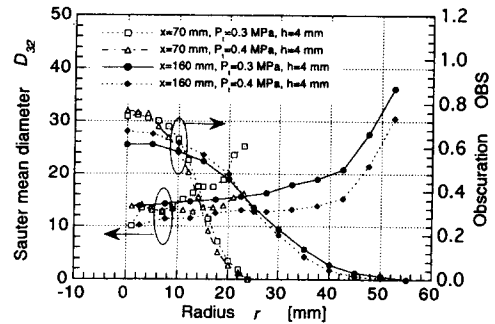
MPa 로 변화시키면서 분무의 공간적인 변화를 측정하여 가스/액체 질량유량 비(GLR)에 따른 단면 평균 액적직경을 구한 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 액체유량을 일정하게 하면서 가스유량을 증가시켰을 때, 액적의 길이평균직경 D_{10} 은 가스/액체 질량유량 비의 증가에 따라 미소한 감소경향을 나타내지만 SMD는 상대적으로 급속히 감소한 후 거의 한계에 도달한다. 이러한 SMD 감소경향은 단위 액체질량당 환상제트의 분열에너지가 점차적으로 증가하기 때문이다. 이것은 분사가스압력이 증가할수록 액적입경이 작을수록 더 잘게 쪼개는 것이 어렵고 분무미립화 효율이 떨어지는 것을 의미한다. 이러한 경향은 Kim 과 Marshall⁽¹⁾의 실험 상관관계식에서 GLR이 3을 전후하여 지수가 바뀌고 질량중양직경 (mass median diameter, D_{50})이 $10\mu\text{m}$ 를 전후하여 에너지소모량의 지수가 바뀌면서 현저히 증가하는 사실과 정성적으로 일치한다. 본 실험 조건에서는 SNC 노즐의 경우 0.4 MPa 근처에서 임계 Weber수에 도달하며 분사가스압력이 증가할지라도 더 이상의 SMD 감소는 매우 어렵게 됨을 알 수 있었다.

분사노즐에서 분무축거리에 따른 분무특성을 고찰하기 위해서 노즐출구에서 70mm와 160mm 지점의 단면에 대해 분무의 공간분포특성을 비교하였다. 이때의 액체유량은 200 ml/min 이고 분사가스 정체압력은 0.3 MPa와 0.4 MPa 이다. 돌출길이 0 mm인 평면형 SNC 노즐과 돌출길이 4 mm인 돌출형 SNC노즐에 대하여 단면평균 액적직경을 비교한 결과를 Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)에 각각 나타냈다. 분무축거리가 70mm인 단면에서 측정된 광소멸분포는 쉽게 예측할 수 있는 바와 같이 분무축거리가 160 mm인 단면보다 분무반경이 작고 액적의 수 밀도가 높기 때문에 분무의 중앙부근에서 매우 높고 반경이 증가함에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. SMD의 공간분포는 분무축거리가 70 mm인 단면에서는 분열과정을 통하여 미립화된 액적들이 재배열될 시간이 충분하지 않기 때문에 그다지 매끄럽지 못하지만 하류로 내려갈수록 액적의 관성에 따라 분무가 전개되고 재배열되어 분무축거리가 160 mm인 단면에서는 반경방향으로 비교적 매끄럽게 증가한다.

분사가스압력이 0.3 MPa에서 0.4 MPa로 증가할 때 동일한 반경에서 SMD의 변화는 축거리가 긴 단면보다 짧은 단면에서 상대적으로 큰 것으로



(a) Flush type SNC nozzle



(b) Protrusion type SNC nozzle

Fig. 10 Influence of axial distance on drop size distribution in SNC nozzle.

나타났다. 또한 축거리가 동일한 단면에 대해서 분사가스압력이 0.3 MPa에서 0.4 MPa로 증가할 때 SMD는 각 단면에서 전반적으로 감소하기 때문에 단면평균 SMD는 Fig. 7과 같이 감소할 것이라는 것을 쉽게 예측할 수 있다. Fig. 10(b)는 돌출형 SNC 노즐에 대한 결과를 나타낸 것으로 분무경계 부근에서 SMD가 크게 증가하는 것을 제외하고는 대체로 평면형 SNC 노즐과 유사하였다.

4. 결 론

공정산업분야 및 분무연소분야에서 많이 사용되고 있는 외부혼합형 음속 2유체분무기의 분무특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정한 액체공급량에 대해 액적의 SMD의 공간분포는 반경방향으로 증가하고, 분사가스압력이 증가함에 따라 SMD의 변화율은 현저히 감소하여 반경방향의 증가가 둔화된다.

(2) 동일한 가스/액체 질량비에서는 액체유량을 증가시키기에 따라 SMD는 감소하며, 평면형 노즐의

미립화효율이 돌출길이 4mm인 돌출형 노즐보다 우수하다.

(3) 직경 2mm와 9mm 레이저빔을 사용하여 액적입경을 측정할 결과, 본 실험조건에서는 레이저빔 직경의 영향이 작다.

(4) 분무축방향거리가 감소함에 따라 광소멸분포는 액적의 수 밀도가 높아지기 때문에 분무의 중앙부근에서 매우 높고 반경이 증가함에 따라 감소한다.

참고문헌

- (1) Kim, K. Y. and Marshall Jr, W. R., 1971, "Drop-Size Distributions from Pneumatic Atomizers," *AICHE Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 575~584.
- (2) Ranger, A. A. and Nicholls, J. A., 1972, "Atomization of Liquid Droplets in a Convective Gas Stream," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 1203~1211.
- (3) Lorenzetto, G. E. and Lefebvre, A. H., 1977, "Measurements of Drop Size on a Plain-Jet Airblast Atomizer," *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 1006~1010.
- (4) Ünal, A., 1989, "Liquid Break-Up in Gas Atomization of Fine Aluminum Powders," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 20B, pp. 61~69.
- (5) Kihm, K. D. and Chigier, N., 1991, "Effect of Shock Waves on Liquid Atomization of a Two-Dimensional Airblast Atomizer," *Atomization and Sprays*, Vol. 1, pp. 113~136.
- (6) 정선재, 이상용, 1992, "제한된 공간내 분무의 유동특성 실험," 대한기계학회 논문집, 제16권, 제5호, pp. 1011~1018.
- (7) 노병준, 강선재, 오재하, 1992, "액주형 동축노즐 분무의 무화특성에 관한 실험적 연구," 자동차공학회지, Vol. 14, No. 5, pp. 41~53.
- (8) 박병규, 이준식, 1996, "초음속 2유체 분무노즐의 유동특성," 대한기계학회 논문집, 제20권, 제7호, pp. 2267~2276.
- (9) Hecht, E., 1987, *Optics*, second edition, Addison-Wesley Publishing Company.
- (10) Felton, P. G., Hamidi, A. A. and Aigal, A. K., 1985, "Measurement of Drop Size Distribution in Dense Sprays by Laser Diffraction," *ICLASS-85, Institute of Energy*.
- (11) Hammond, Jr, D. C., 1981, "Deconvolution Technique for Line-of-Sight Optical Scattering Measurements in Axisymmetric Sprays," *Applied Optics*, Vol. 20, No. 3, pp. 493~499.
- (12) Dodge, L. G., Rhodes, D. B. and Reitz, R. D., 1987, "Drop-size Measurement Techniques for Sprays: Comparison of Malvern Laser-Diffraction and Aerometrics Phase/Doppler," *Applied Optics*, Vol. 26, No. 11, pp 2144~2154.
- (13) Care, I. and Ledoux, M., 1991, "Study of an Airblast Coaxial Atomizer: Experiments and Modelisation," *ICLASS-91*, Paper 85, U. S. A.
- (14) Saad, M, A, 1993, *Compressible Fluid Flow*, 2nd ed., Prentice Hall.