

〈논 문〉

축소확대 노즐에 의한 2유체 미립화의 유동가시화 및 분무특성

박 병 규* · 이 준 식**

(1996년 12월 26일 접수)

Flow Visualization and Spray Characteristics of Twin-Fluid Atomization with Converging-Diverging Nozzles

B. K. Park and J. S. Lee

Key Words: Flow Visualization(유동가시화), Spray Characteristics(분무특성), Particle Size Measurement(입경측정), Converging-Diverging Nozzle(축소확대노즐), Tomography(토포그래피), Twin-Fluid Atomization(2유체 미립화)

Abstract

Present study visualized flow pattern and investigated spray characteristics of twin-fluid atomization with converging-diverging nozzles. Particle sizes were measured by using the Malvern particle analyzer, and the radial size distributions were evaluated by using the tomographic transform technique. The results show that the SMD generally increases in the radial direction at a prescribed liquid flow rate and the increasing rate in the SMD becomes gradual as atomizing gas pressure increases. The SMD decreases as the liquid flow rate increases at a fixed GLR(gas/liquid mass ratio). The atomization performance of the protrusion-type nozzle turned out to be superior to that of the flush-type. However, in the case of the protrusion-type, flow separation occurs outside the liquid delivery tube when the pressure at the gas nozzle chamber is high enough, which may deteriorate the atomization performance.

기 호 설 명		OBS : Malvern 입경분석기로 측정 한 광소멸 (Obscuration)	
A	: 노즐의 유동단면적, mm ²	P	: 가스의 절대압력, Pa
d_i	: 노즐출구면에서 환상가스유로의 내경, mm	p	: 가스의 상대압력, Pa
d_o	: 노즐출구면에서 환상가스유로의 외경, mm	p_n	: 가스노즐 압력
D_{10}	: 길이 평균직경, mm	Q	: 체적유량, ml/min
D_{32}	: Sauter 평균직경, SMD, mm	r	: 분무의 반경방향 좌표, mm
GLR	: 가스 질량유량과 액체 질량유량의 비	x	: 분무의 축방향 좌표, mm
h	: 노즐 오리피스의 돌출길이, mm	첨 자	
L	: 길이, mm	b	: 배압(대기압) 상태
M_e	: 노즐출구 Mach수	c	: 환상제트(액체공급관) 중심축
		c_0	: 액체공급관 출구 선단
		e	: 노즐 출구

*회원, 서울대학교 대학원

**회원, 서울대학교 기계공학과

f_e : 노즐 출구에서 완전팽창 유동 상태
 L : 액체
 ns : 노즐 출구에서 수직충격과 발생 유동 상태
 stg : 환상제트의 충돌정체점
 $supersonic$: 초음속유동
 t : 정체조건
 $*$: 노즐 목

1. 서 론

액체를 가스로 분무미립화하는 것은 산업용로, 가스터빈, 디젤엔진, 로켓 등에서의 분무연소 관련 분야와 분무냉각, 분무건조, 금속분말의 제조, 분무주조, 분무코팅 등의 열공정산업 분야에 널리 활용되고 있으며, 이외에도 의약산업, 식품산업, 기상학 분야에 많이 응용되고 있다.

가스제트를 사용한 미립화에 대한 연구는 대부분이 공기유동의 Mach 수가 0.3보다 낮은 아음속이었다. 그러나 출구 Mach 수가 0.3을 넘으면 압축성의 영향을 고려해야 한다. 가스분사 분무기에서 가스의 공급압력이 충분히 높으면 단면축소확대 노즐의 목에서는 음속에 도달하며 가스유동은 초킹(choking)된다. 초음속 2유체 노즐에서 액체의 공급이 없는 압축성 분사가스만의 유동특성, 즉 고압 분사가스 압력에 따른 흡인압력 측정 및 솔리렌사진 가시화를 통한 압축과 팽창과의 가시화 등을 통한 유동특성의 파악은 액체의 미립화를 이해하는데 있어서 매우 중요하다. 환상의 고속분사 가스제트가 노즐출구 하류에서 충돌정체점을 형성함으로써 압력이 상승하며, 이 압력이 오리피스를 통해 공급되는 액체압력보다 높아지면 액체가 역류할 수 있기 때문에 액체공급관 출구압력은 불안정한 미립화조건(unstable atomization condition)을 예측하는 가늠자로서 유용하다.

Baram⁽¹⁾은 초음속 노즐에서 안정된 분무미립화 조건을 진단하기 위해 분사가스압력에 따른 액체공급관의 압력변화 특성을 고찰하였으며, Anderson 등⁽²⁾은 초음속 2유체 분무미립화에서 분사가스압력에 따른 액체공급관 압력측정을 통하여 안정된 분무미립화 조건을 진단하고 솔리렌 사진 가시화와 수리학적 상사를 이용하여 측정된 압력과 정성적으로 비교하였다. Kim과 Marshall⁽³⁾은 용융밀랍(molten wax)을 미립화하고 현미경으로 응고된 밀랍 입자들의 수를 세고, 크기를 측정하였다.

Ranger와 Nicholls⁽⁴⁾는 영사진가시화 방법을 사용하여 충격관내로 분사된 액적들의 분열을 관찰하였다. Ünal⁽⁵⁾은 초음속분무노즐에서의 유동을 가시화하여 정량적인 분석을 하였으며, 표본을 채집하여 입경분포를 측정하였다.

한편 비교적 높은 압력의 분사가스제트에 의한 분무특성을 온라인으로 측정된 연구들을 살펴보면, Ingebo⁽⁶⁾는 고속가스유동에 의해 분열되는 내부혼합형 2유체분무기에서 가스의 질량유속이 SMD에 미치는 영향을 가속파동영역(acceleration wave regime)에서 산란광 스캐너로 측정하였다. Sanakar 등⁽⁷⁾과 Puissant 등⁽⁸⁾은 액체로켓 노즐에서 분무통 압력과 액체/기체 질량유량 비가 분무특성에 미치는 영향을 PDPA를 사용하여 고찰하였다. Kihm과 Chigier⁽⁹⁾는 2차원 평판형 공기분사노즐에서 미립화에 대한 충격파의 영향을 관찰하기 위해 광산란 방법을 사용하여 액적크기를 측정하였으며, 평균 액적크기는 공기와 액체의 질량비, 상대속도의 증가에 따라 감소하고 음속조건에서 미립화한계에 도달함을 밝혔다.

국내에서는 정과 이⁽¹⁰⁾가 시판되고 있는 심플렉스형 와류분무 노즐을 사용하여 제한된 공간내 분무의 유동특성 실험을 수행하여 액적의 공간분포를 구하였으며, 노 등⁽¹¹⁾은 액주형 동축노즐 분무의 무화특성을 액침법을 이용한 영상처리기법으로 분석하였다. 박과 이⁽¹²⁾는 외부혼합형 단면축소 음속노즐을 사용한 2유체 분무미립화의 분무특성 실험을 수행하여 액적의 공간분포를 구하였다.

본 연구에서는 높은 가스분사압력을 사용할 때의 2유체 미립화, 예를 들면 금속분말의 제조 또는 분무주조 공정 등에서 일어날 수 있는 불안정한 분무미립화 조건과 유동박리현상의 영향 등을 규명하기 위하여, 가스유로가 단면축소확대되는 환상노즐로부터 분사되는 고속가스제트의 유동특성을 분석하고 이 제트에 의한 분무미립화 특성을 상호연관시켜 고찰하고자 하였다. 이를 위해 먼저 고압의 분사가스에 의한 초음속 유동현상을 고찰한 후 분무미립화와 관련된 인자들, 즉 분사가스압력, 액체유량, 액체공급관(노즐오리피스) 돌출길이를 각각 변화시킴으로써 미립화특성을 고찰하였다. 실험에 사용한 가스는 질소이며, 액체로는 물을 사용하였다. 입경측정장치를 사용하여 액적크기를 온라인으로 측정하고, 토모그래피변환기법을 이용하여 액적입경의 반경방향 분포와 단면 평균직경을 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

고속으로 분사되는 가스는 충분한 유량과 압력을 유지할 수 있도록 Fig. 1과 같이 액체질소를 기화시켜 사용하였다. 수직하방향으로 고속제트가 분사되도록 가스분사노즐을 설치하였다. 액체유량과 분사가스유량을 독립적으로 변화시킬 수 있도록 하기 위해 가변유량계를 설치하였다.⁽¹³⁾

노즐형상은 Fig. 2와 같이 내경이 일정한 액체공급관을 환상의 가스유로가 둘러싸고 있는 구조로 되어 있다. 노즐오리피스 내벽은 축과 평행하게 설계하였으며, 가스유로는 축소확대 단면이 되도록 하기 위해서 노즐오리피스 상부 외벽은 축과 평행하게 하고 하부 외벽은 축과 8도 경사지게 설계하

여 단면 축소확대(CDI) 노즐을 제작하였다. 따라서 노즐의 목단면적 A^* 는 9.14 mm^2 이고, 출구/목단면적 비는 1.0보다 크다. 가스 출구면으로부터 액체공급관의 돌출길이 h 는 노즐의 액체공급관 상부에 부착하는 부싱(bushing)의 높이를 변화시킴으로써 0~7 mm로 조절할 수 있게 하였다. 액체공급관의 돌출길이에 따른 분사가스 유로의 기하학적 형상과 이상기체의 등엔트로피 팽창 유동인 경우의 유동상태를 Table 1에 나타냈다.

2.2 실험방법

2.2.1 노즐출구 초음속 유동의 가시화

노즐출구에서의 초음속 가스유동을 가시화하기 위하여 슐리렌 사진법을 사용하였다. 광원(Xenon lamp)으로부터 나온 빛을 초점거리 2m, 구면경의

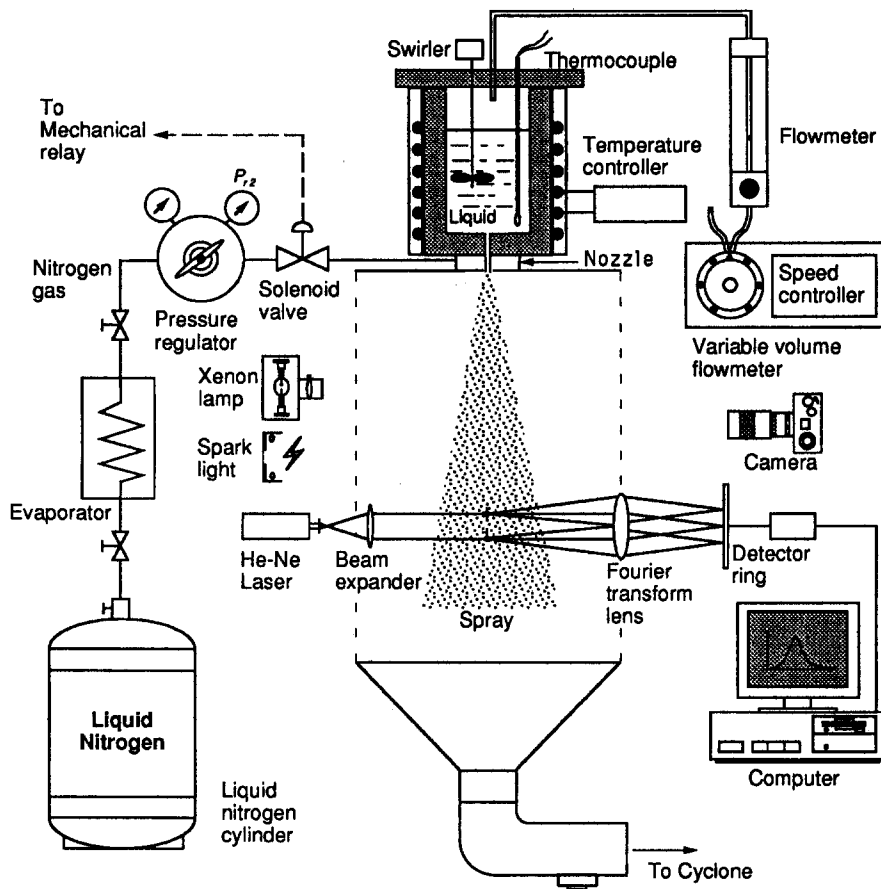


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

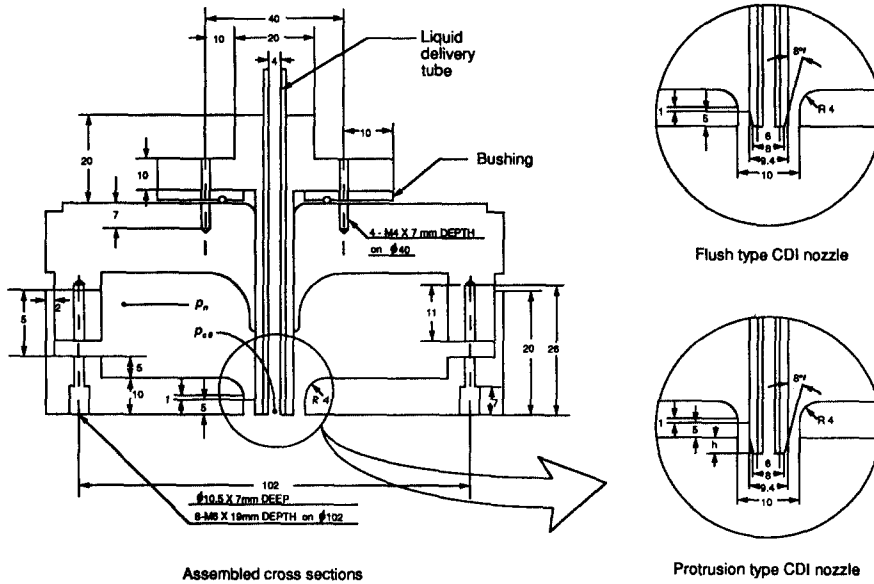


Fig. 2 Cross-sectional views of converging-diverging (CDI) twin-fluid atomization nozzles.

Table 1 Geometric dimensions and flow conditions of a perfect gas in CDI nozzles.

	Protrusion height [mm]		
	0	2	4
d_i [mm]	8.0	8.56	9.12
d_o [mm]	10.0	10.0	10.0
A_e [mm ²]	28.34	21.03	13.23
$M_{e, fe}$	3.10	2.35	1.81
$M_{e, ns}$	0.47	0.53	0.61
$P_{t, fe}$ [MPa]	2.218	1.370	0.591
$P_{t, ns}$ [MPa]	0.274	0.218	0.162

직경 250 mm인 오목거울로 반사시켜 평행광을 얻었다. 광원앞에는 램프-렌즈 조합의 초점에 핀홀을 설치하였다. 노즐은 시험체적부의 평행 광로에 수직하방향으로 설치하였고, 가스는 질소를 사용하여 실험하였다.

분무의 내부구조를 파악하기 위해서는 광원으로 침대봉 전극에 10~17 kV의 고전압을 걸어서 방전 현상을 이용하는 섬광관간광원 (spark light source) 을 사용하였다. 이 광원의 발광지속시간은 2 μs로서 액체의 분무미립화 과정을 역광으로 사진촬영함으로써 분무의 내부구조를 가시화하였다. 또한 정사진술을 사용하여 액체 분무미립화의 일반적인 구

조를 파악하였다. 표준 35 mm 필름 (24 mm×36 mm 크기) 과 보통 카메라에 105 mm 망원렌즈와 주름상자를 사용하여 2유체 분무기에서 액체의 미립화 분무과정을 확대된 영상으로 가시화하였다. 직사진으로 분사가스압력에 따른 노즐출구부근의 분무를 가시화함으로써 초음속유동에서의 충격파와 경계층의 상호작용에 의한 유동의 박리현상을 확인하였다.

2.2.2 액체공급관 출구압력의 측정

고속가스제트가 환상노즐을 통하여 분사될 때 분사가스 압력변화에 따른 액체공급관 출구에서의 정압 (분사 가스제트의 흡인효과에 의해 발생한 압력 p_{c0}) 과 분무중심축에서의 압력 p_c 를 측정함으로써 환상가스제트의 총돌정체로 인하여 액체공급관 출구의 압력이 관 내부압력보다 높아지는 불안정한 미립화 판정기준으로 사용 가능성을 검토하였다.

고속가스제트가 분사노즐을 통하여 분사될 때 가스분사노즐 내부유동을 이상기체의 1차원 등엔트로피유동으로 가정하면 단면 축소확대 노즐내의 유동상태는 정체압력과 배압 비의 함수로써 나타낼 수 있다. (12) 가스의 단위면적당 질량유량이 정체압력에 의존하므로 분사질소가스의 정체압력을 측정하기 위해서 노즐 상부분체에 압력측정공을 내고 압력변환기 (Validyne DP15TL, CD12 transducer indi-

cator)를 연결하였으며, 압력변환기의 교정된 전압은 자료획득장치(HP3852A)의 적분전압기(integrating voltmeter HP44701A)모듈을 통하여 측정된다. 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 디지털 메모리스코우프로 감시하였다. 액체유량은 분사가스유량과 독립적으로 변화시킬 수 있도록 하기 위하여 가변체적유량계(Cole-Parmer Ins., Masterflex)의 인가전압을 조정함으로써 유량을 변화시켰으며, 이때의 유량을 직렬로 연결된 측정용 유량계로 측정하였다.

2.2.3 액적크기 측정 및 공간분포

레이저회절 입자크기측정법의 원리는 입자의 직경이 증가함에 따라 회절광의 산란각이 감소하는 Fraunhofer 회절이론을 이용한 것이다. 다른 직경의 입자들에 의한 산란광 에너지는 일련의 반원환 모양의 광다이오드들에 의해 측정된다. 측정데이터의 분석에는 Rosin-Rammler 분포함수 모델을 적용하여 반복적으로 크기분포를 계산한다. 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⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 수정식을 사용하여 수정하였다. 측정기기는 표준 보정용 레티클(reticle)을 사용하여 실험 전후에 정확도를 확인하였다.

경로적분된 실험데이터를 국소점데이터로 변환하여 재구성하는 토모그래피변환을 이용하면 측정변수의 공간분포를 얻을 수 있다. 축대칭인 분무의 경우 공간분포 계산과정은 Fig. 3과 같이 분무를 각도에 따른 변화 없이 반경에 따라 변하는 환상의 링들로 나누고 분무의 여러 위치에서 얻은 관측선 평균된 데이터를 이용하여 각각의 링에 대한 크기분포와 수밀도를 계산하였다.^(15, 16) 분무특성 실험에서 불확실성 분석을 하기는 매우 어렵지만 일반적으로 표준 레티클을 사용하여 보정한 공간평균 SMD의 측정오차는 3% 이내이며, 토모그래픽 재구성과정에서 발생하는 수학적 계산오차가 있기 때문에 공간분해한 SMD오차는 커질 것이며 기타 오차의 발생요인인 액적의 비구형성, 가스제트에 의

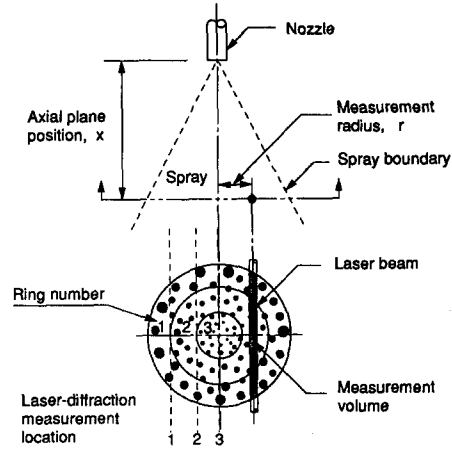


Fig. 3 Deconvolution ring and line-of-sight geometry.

한 레이저 빔의 경로변경(beam steering) 오차, 다중산란의 보정오차 등을 고려하면 SMD의 총 오차는 7% 이내 인 것으로 평가되었다.

3. 결과 및 검토

3.1 초음속 환상 가스제트의 유동양상 및 압력 변화

본 연구에서 노즐의 배압(back pressure)은 모든 실험조건에서 대기압이다. 먼저, 질소가스로 운전되는 초음속 환상제트인 경우 노즐 출구에서의 유동양상을 도시하면 Fig. 4와 같이 과소팽창 노즐유동과 과대팽창 노즐유동으로 나눌 수 있다. 환상가스유로에서의 가스유동을 이상기체의 등엔트로피 유동으로 가정하고 준 1차원모델을 사용하여 액체 공급관의 돌출길이에 따른 유동상태를 계산하여 Table 1에 나타냈다. 예를 들면, h 가 0 mm인 경우 분사가스의 정체압력이 0.274 MPa이면 노즐 출구면에서 수직충격파가 생기고, 분사가스의 정체압력이 2.218 MPa이면 완전팽창 노즐유동이 되며 이 때의 출구 마하수는 3.10이 된다.

초음속 유동인 경우 슬리텐 사진으로 노즐 출구 외부선단에서 팽창파 또는 경사충격파가 형성되어 가스 제트의 내외 경계면에서 반사되는 것을 볼 수 있다.⁽¹³⁾ 초음속 환상제트의 내외부 제트경계면이 자유압력 경계면이라고 가정하면 충격파는 외부 제트경계면에서 팽창파로 반사되고 이 팽창파는 내부 제트경계면에서 압축파로 반사를 계속한다. 이 초

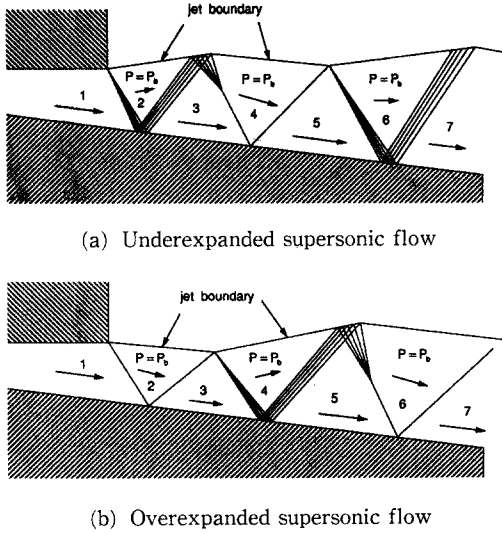


Fig. 4 Schematic of supersonic flow pattern in (a) underexpansion and (b) overexpansion.

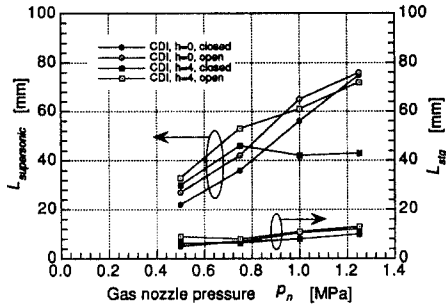
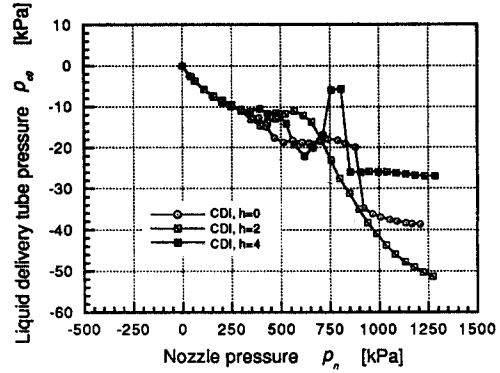
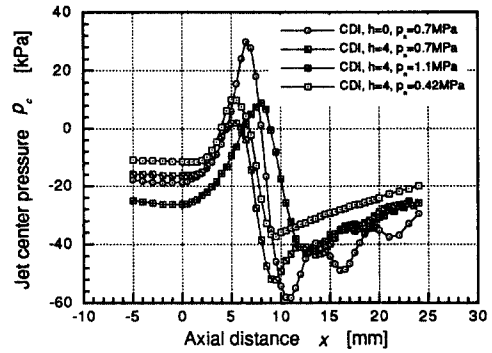


Fig. 5 Variations of stagnation point and supersonic flow length for various atomizing gas pressures in CDI nozzle.

음속파의 형상을 솔리덴 사진으로 가시화하여 정리하면 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 가스노즐압력이 증가함에 따라 초음속유동 길이가 증가하는 경향을 나타내며 액체공급관 끝에서 약 20~70 mm 지점에서 사라진다. 이것은 주위로부터의 공기유입과 난류확산에 의해 아음속 유동이 되었음을 의미한다. 또한 Fig. 5에서 돌출길이가 4 mm이고 액체공급관을 막은 경우가 다른 경우와는 달리 가스노즐압력이 증가함에도 불구하고 10 MPa와 12.5 MPa에서 초음속유동 길이가 오히려 줄어든 것은 동일한 압력조건에서 직사진 가시화와 비교 확인한 결과, 가스노즐압력이 0.85 MPa 이상에서는 다음에 설명할 유동박리현상에 의한 것으로 밝혀졌다(Fig.



(a)



(b)

Fig. 6 Variations of (a) liquid delivery tube pressure and (b) jet center pressure for various gas nozzle pressures in CDI nozzles.

7 참조). 실제 액체공급이 있는 경우에는 액체공급관을 연 경우보다 막은 경우의 초음속 유동양상과 거의 유사함을 솔리덴사진으로 확인하였으며, 이것은 본 실험에서는 가변유량계를 사용하여 액체유량을 적은 양으로 조절했기 때문이다. 한편, 가스노즐압력이 환상제트의 충돌정체점 길이에 미치는 영향은 Fig. 5로부터 초음속유동 길이에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 여기서 충돌정체점 길이는 솔리덴 사진으로부터 노즐오리피스 선단에서 환상제트가 합쳐지는 재순환영역 하류 목까지의 길이로 정의하였다.

2유체 미립화 노즐에서 액체의 공급이 없는 경우 액체공급관에서의 흡인압력을 측정하였다. 측정된 압력은 분사가스압력 p_n 과 액체공급관 출구압력 p_{c0} 및 제트 중심축 상의 압력 p_c 이다(Fig. 2). 고속분사가스로는 질소를 사용하였고, 분사가스압력

은 압력조절기의 2차압력 p_{r2} 를 0.05 MPa씩 증가 시키가며 측정함과 동시에 액체공급관에서의 흡인 압력을 측정하여 그 결과를 Fig. 6(a)에 나타냈다. 오리피스 돌출길이에 따라 각 곡선에서 구배의 전환점, 극대점 및 극소점과 같은 세부사항은 다를 지라도 전체적인 경향은 단면축소 음속(SNC)노즐과 유사하게 나타났다.⁽¹³⁾

압력곡선에서 주목할 것은 흡인압력 극소점이다. 이 점은 Fig. 6(a)에 나타낸 CDI 노즐에서 돌출길

이가 4 mm인 경우 운전압력이 약 0.8 MPa일 때 일어난다. 제트가 액체공급관 선단모서리에서 팽창 파를 형성하면 축방향으로 휘게 된다. 이와 같이 축방향으로 휘어짐으로써 초음속환상제트의 충돌정체점과 액체공급관 선단에 존재하는 재순환 와동은 작아지게 된다. 이것은 흡인압력이 낮은 점은 작은 와동과 관련되어 있다는 것을 의미한다(Fig. 7). 또한 이 CDI 노즐에서 돌출길이가 4 mm인 경우 0.85 MPa이상의 압력에서 유동박리가 발생하여

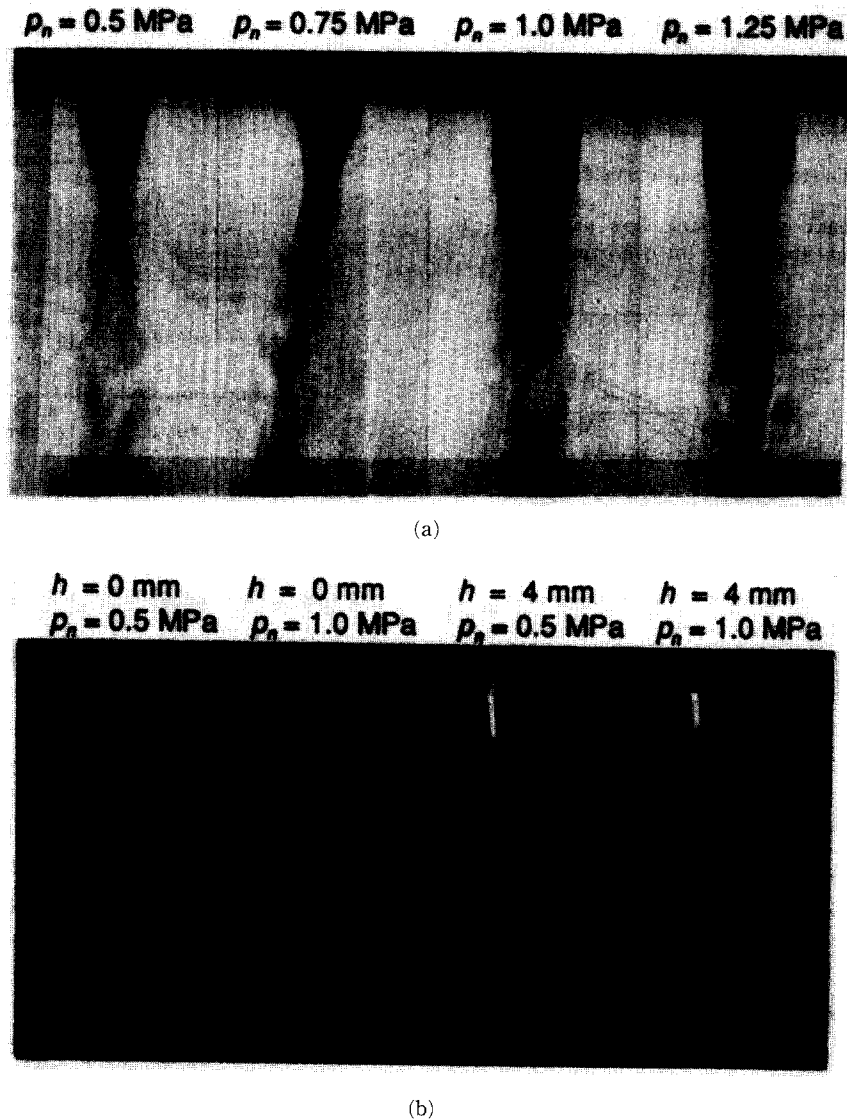


Fig. 7 Photographs for gas atomization of water in CDI nozzle using (a) spark light source ($h=4\text{mm}$, $p_n=0.5\sim 1.25\text{MPa}$) and (b) direct photography ($p_n=0.5$ and 1.0MPa ; $h=0$ and 4 mm).

흡인압력이 급격히 증가한 후 운전압력이 증가하여도 흡인압력은 거의 일정하다는 사실이다. 이것은 유동박리의 예측을 쉽게 확인할 수 있게 해준다.

또한 Fig. 6(b)에서 돌출길이가 0 mm이고 분사 가스압력이 0.7 MPa인 경우, 액체공급관 하류 재순환영역에서의 압력 p_c 는 노즐 오리피스(액체공급관) 내부에서는 거의 일정하게 유지되며, 액체공급관 출구에서 초음속확장제트의 충돌정체점까지는 급격히 증가한다. 이 점을 지나서 하류방향으로 진행해 나가면, 압력은 충돌제트의 유속에 의해 급격히 감소하여 음압상태가 되며 충격파 세포상(shock cell)을 통과하게 됨에 따라 미소한 증감을 반복하며, 전체적인 흡인압력의 크기는 줄어드는 경향을 나타냈다.

2유체 미립화에 의한 분무의 내부구조를 관찰하기 위하여 발광지속시간이 2 μ s인 섬광순간광원을 사용하여 확대된 영상으로 가시화하여 Fig. 7(a)에 나타냈다. 분사가스의 압력이 높아지면 흡인압력이 증가하고 액체공급관 내부에서 기포가 생성 진동하여 액체 덩어리로 떨어져 나간다. 고속분사 가스제트에 의해 분열 미립화 과정을 거치면서 미세한 액적이 되며, 이렇게 형성된 분무는 Fig. 7(a)에 나타낸 바와 같이 순간적으로는 내부구조가 불균일함을 알 수 있었다. 그러나 분무의 순간적인 내부구조는 불균일할지라도 직사진술을 사용하여 가시화한 결과를 Fig. 7(b)에 나타냈으며, 이로부터 노즐 출구부근에서 분무의 전체적인 대칭성 형태를 관찰할 수 있었다.

노즐 오리피스의 돌출길이가 4 mm 인 경우 노즐

압력이 0.85MPa 이상이면 초음속유동에서의 충격파와 경계층의 상호작용에 의한 유동박리가 일어나고 액체공급관 하류의 재순환영역이 커짐을 Fig. 7(b)에서 확인할 수 있었다.

유동박리시 일부 액체는 액체공급관 선단에서 가스제트와 만나지 않고 분사가스유동과 반대방향으로 액체공급관 외벽을 따라 1.55 mm 정도 거슬러 올라간다. 액체공급관 외벽에 형성된 액체환은 가스유동에 의해 쪼개져서 액적을 형성한다.

이러한 유동박리 현상을 이해하기 위해서는 노즐 선단 주위의 가스유동에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에 사용한 노즐출구 간극이 액체공급관 원주에 비해 충분히 작기 때문에 2차원 평면유동에서의 충격파와 경계층의 상호작용을 근사적으로 적용할 수 있다. 2차원 평면유동에서 충격파와 경계층이 상호작용하는 경우에 대해서는 Fig. 8에 정성적으로 나타냈다. 이 경우 경계층에서 압력이 증가하기 시작하는 점은 충격파 입사점보다 상류에서 시작된다. 이러한 압력상승으로 경계층은 두꺼워지고 유선의 곡률에 의하여 압축파가 생기며 이것이 합쳐져서 원래의 충격파 입사점보다 상류에서 반사충격파를 형성한다. 충격파 입사점 상류의 역압력구배가 충분히 클 때 경계층을 박리시키고 첫번째 반사충격파의 강도를 증가시킨다. 유동박리영역에서는 압력이 거의 일정하기 때문에 입사충격파는 이 영역에서 팽창파로 반사되고 유동은 벽면 쪽으로 편향되어 경계층이 재부착하게 된다. 팽창파를 통한 유동 방향의 회전각이 클 때 유동은 벽면 쪽으로 향하게 되고, 뒤이어 벽면을 따라 유동이 방향을 바꿀 때

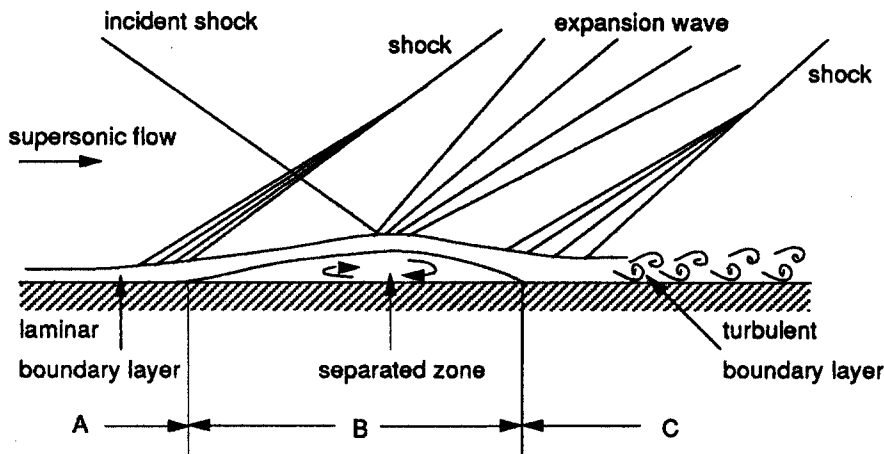


Fig. 8 Schematic of shock-boundary interaction flow pattern producing flow separation.

두번째 반사충격파가 생긴다. 이 충격파의 외견상의 원점은 원래의 충격파의 입사점보다 훨씬 하류이다. 이 유동박리 현상은 충격파와 경계층의 상호작용으로 일어나며 노즐의 출구/목 면적비와 분사가스의 성질에 의존한다.

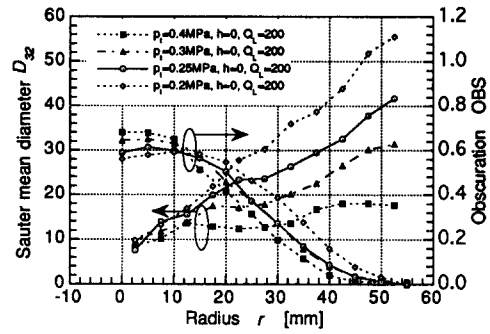
이러한 사실로부터 액체가 액체공급관 외벽을 따라 역류가 일어나는 것은 액체공급관의 선단이 박리기포 영역내(Fig. 8에서 액체 공급관 선단이 B영역)에 있는 경우 박리된 가스유동이 재부착되지 못하고 박리기포내의 재순환유동이 액체 공급관 선단에 형성된 액막을 끌어당기기 때문임을 알 수 있다.

3.2 액적크기 및 공간분포

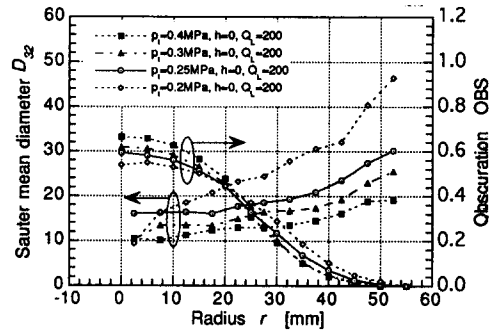
미립화에 관련된 인자들을 변화시켜가며 분무특성을 조사하기 위해 노즐출구에서 160 mm 지점의 단면에 대해서는 분사가스 압력을 0.2~0.4 MPa, 액체유량을 100~300 ml/min로 변화시키면서 액체공급관 돌출길이가 0 mm(평면형)와 4 mm(돌출형)인 경우에 대해서 각각 직경 9 mm 레이저 빔을 사용하여 분무중심축에서 반경방향 5 mm간격으로 액적입경을 측정하였다. 분무의 공간분포특성을 고찰하기 위하여 측정자료는 Dodge 등⁽¹⁶⁾의 방법으로 재구성하여 입경의 반경방향 분포와 단면평균 입경을 구하였다.

액체공급관이 평면형과 돌출형인 경우의 각각에 대해서 분사가스 정체압력을 0.2~0.4 MPa로 변화시키고, 액체유량이 200 ml/min, 노즐출구로부터 160 mm 지점에서의 결과를 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 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.

평면형 CDI 노즐에서 분사가스 정체압력이 낮은 경우 분무의 중앙부근에서는 광소멸이 미소한 증가를 나타낸 후 반경방향으로 서서히 감소하지만, 정체압력이 증가함에 따라 분무의 중앙에서 크며 경계에서 감소하는 종 모양을 나타낸다. 노즐압력이 증가할수록 분무단면의 전체적인 입경분포가 보다 균일해지고 입경이 작아져서 산란각이 커지기 때문



(a) Flush type CDI nozzle



(b) protrusion type CDI nozzle

Fig. 9 Radial distributions of deconvoluted SMD and obscuration for various gas pressures in CDI nozzle.

에, 분무 중앙에서는 광소멸이 높지만 반경이 증가함에 따라 측대칭인 분무와 레이저 평행광이 교차하는 체적이 감소하고 가스에 대한 액체의 체적분율이 감소하기 때문에 광소멸이 빨리 감소한다. 돌출형 CDI 노즐에서도 전체적인 경향은 유사하지만 분무중심축으로부터 동일한 반경에서 SMD가 상대적으로 낮은 분포를 나타내어 돌출형의 미립화효율이 우수함을 알 수 있다.

CDI 노즐의 출구에서 측정거리 160 mm 인 단면에서 가스/액체 질량유량 비(GLR)에 대한 분무단면 평균 SMD 변화를 액체유량에 따라 Fig. 10에 나타냈다. 액체유량을 일정하게 하면서 분사가스 압력(가스 질량유량)을 증가시켰을 때 액적의 SMD는 가스/액체 질량비의 증가에 따라 급속히 감소한다. 이러한 SMD 감소는 단위 액체질량 당 환상제트의 분열에너지의 점차적인 증가에 따른 것이다. 가스/액체 질량비가 증가함에 따라 SMD의 감소율은 현저하게 줄어들며 이것은 미립화가 한계에 도달하는

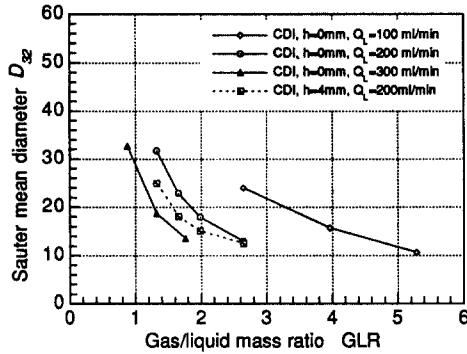


Fig. 10 Influence of gas/liquid ratio on cross-sectional-averaged drop size in CDI nozzles at axial distance $x=160\text{mm}$.

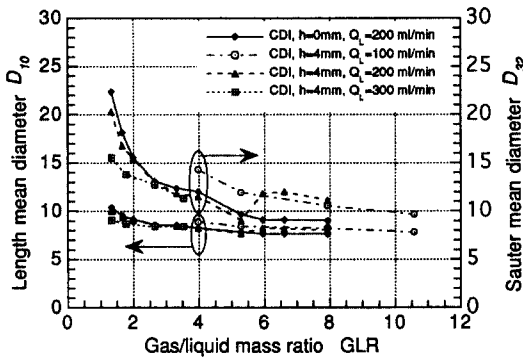


Fig. 11 Influence of gas/liquid ratio on cross-sectional-averaged drop size in CDI nozzle at axial distance $x=70\text{mm}$.

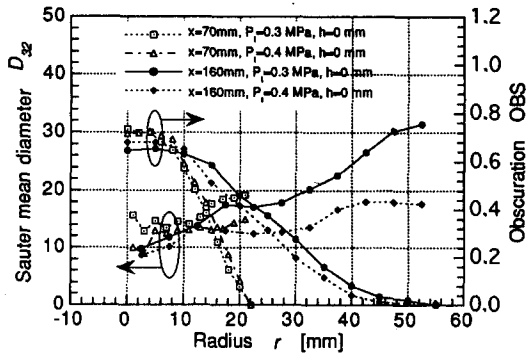
것을 의미한다. 그러나 동일한 가스/액체 질량비에서는 액체공급량이 많을수록 액적직경은 작아져서 미립화효율은 상승하며 이 결과는 평면 2차원노즐의 결과와 일치한다.⁽⁹⁾ 초음속유동에서는 노즐출구 가스속도가 노즐의 출구/목 단면적비에만 의존하므로 분사가스의 압력증가는 분사가스 밀도의 증가로 나타난다. 가스/액체 질량유량비를 일정하게 하면서 액체유량을 증가시키면 분사가스의 압력증가에 의한 밀도가중 가스속도의 증가와 팽창파에 의한 유동방향의 변화로 인해 단위 액체질량당 운동량 전달이 증가하며 미립화효율이 증가하여 분무단면 평균 SMD는 감소하게 된다. 정해진 노즐형태에서 분사가스의 정체압력 또는 유량이 노즐유동과 SMD를 결정하는 데 가장 지배적인 역할을 하는 것은 쉽게 알 수 있다. 또한 Fig. 10으로부터 CDI 노즐에서는 돌출길이가 4 mm인 돌출형 노즐의 미

립화효율이 평면형 노즐보다 우수한 것을 알 수 있으며 이것은 실제 고속제트가 필요한 산업용 노즐에서는 돌출형이 사용되고 있는 사실을 뒷받침해 준다. 이러한 경향은 평면형 노즐의 미립화효율이 돌출형 노즐보다 우수한 단면축소 음속(SNC)노즐의 경우⁽¹²⁾와 상반된 결과를 나타내는데, 이것은 음속노즐의 경우 돌출길이의 변화에 따라 노즐출구에서의 유동상태가 변하지 않지만 단면 축소 확대 노즐의 경우 돌출길이의 변화에 따라 노즐출구에서 가스제트의 유동상태가 변하는 압축성유동 특성 및 충격파/팽창파로 인한 환상 가스제트의 충돌각 변화에 기인하는 것으로 생각된다.

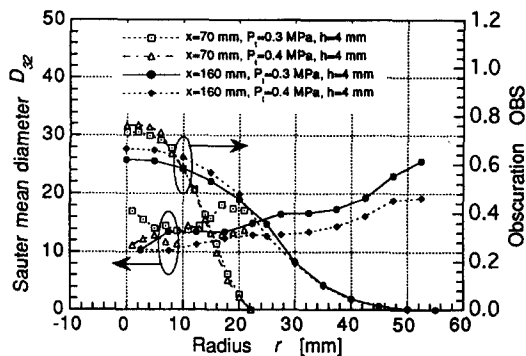
높은 분사가스 압력에 의한 분무특성을 조사하기 위해 노즐출구에서 70 mm 지점의 단면에 대해 액체유량을 200 ml/min, 분사가스 압력을 0.3~1.1 MPa로 변화시키면서 분무중심축에서 반경방향 2 mm간격으로 분무의 공간적인 변화를 측정하여 가스/액체 질량비에 따른 단면평균 액적직경을 구한 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 액체유량을 일정하게 하면서 가스유량을 증가시켰을 때, 액적의 길이평균 직경 D_{10} 은 가스/액체 질량비의 증가에 따라 미소한 감소경향을 나타내지만 SMD는 상대적으로 급속히 감소한 후 거의 한계에 도달한다. 이러한 SMD의 감소경향은 단위 액체질량당 환상제트의 분열에너지의 점증에 따른 것이며, 본 실험조건에서는 CDI노즐의 경우 0.4MPa 근처에서 임계 Weber 수에 도달하며 분사가스압력이 증가할지라도 더 이상의 SMD 감소는 매우 어렵게 됨을 알 수 있었다. 이 경향은 Kim과 Marshall⁽³⁾의 실험 상관관계식에서 GLR 이 3을 전후하여 지수가 바뀌고 질량중양직경 (mass median diameter, D_{50}) 이 10 μm 를 전후하여 에너지소모량의 지수가 바뀌면서 현저히 증가하는 사실과 정성적으로 일치한다.

한편 돌출형 노즐에서 액체유량이 200 ml/min인 경우 SMD는 상대적으로 급속히 감소한 후 가스/액체 질량비가 6근처일 때 갑자기 증가하는 것은 유동박리현상에 의한 영향이다. 이것은 분사가스압력이 증가할수록 액적입경이 작을수록 더 잘게 쪼개는 것이 어렵고, 유동박리현상은 분무미립화 효율을 떨어뜨리므로 가능하면 피해야 하는 것을 알 수 있다.

분사노즐에서 분무축거리에 따른 분무특성을 관찰하기 위해서 노즐출구에서 70 mm와 160 mm 지



(a) Flush type CDI nozzle



(b) Protrusion type CDI nozzle

Fig. 12 Influence of axial distance on drop size distribution and obscuration in CDI nozzle.

점의 단면에 대해 분무의 공간분포특성을 비교하였다. 이때의 액체유량은 200 ml/min이고 분사가스 정제압력은 0.3 MPa과 0.4 MPa이다. 돌출길이 0 mm인 평면형 CDI 노즐과 돌출길이 4 mm인 돌출형 CDI노즐에 대하여 단면평균 액적직경을 비교한 결과를 Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)에 각각 나타냈다. 분무축거리가 70 mm인 단면에서 측정된 광소멸분포는 쉽게 예측할 수 있는 바와 같이 분무축거리가 160 mm인 단면보다 분무반경이 작고 액적의 수 밀도가 높기 때문에 분무의 중앙부근에서 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 매끄

럽게 증가한다. 분무 경계면에서의 SMD를 비교해 볼 때 분무축거리가 160 mm인 경우의 SMD가 70 mm인 경우의 SMD보다 큰 것은 초기에 미립화된 액적들이 하류로 진행함에 따라 액적간의 충돌에 의한 합체 및 분열, 상대적으로 직경이 큰 액적의 초기운동량과 경계면에서의 작은 미립화 효과, 난류가스유동에 의한 액적의 난류분산(turbulent dispersion), 입경에 따른 가스유동에의 추종성 등의 복합적인 요인에 의해 재배열되면서 하류로 이동하기 때문이라고 생각된다.

분사가스압력이 0.3 MPa에서 0.4 MPa로 증가할 때 동일한 반경에서 SMD의 변화는 축방향 거리가 긴 단면보다 짧은 단면에서 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 또한 축거리가 동일한 단면에 대해서 분사가스압력이 0.3 MPa에서 0.4 MPa로 증가할 때 SMD는 각 단면에서 전반적으로 감소하기 때문에 단면평균 SMD는 Fig. 10과 같이 감소할 것이라는 것을 쉽게 예측할 수 있다. Fig. 12(b)는 돌출형 CDI노즐에 대한 결과를 나타낸 것으로 분무경계 부근에서 압력증가에 따른 SMD 차이가 줄어든 것을 제외하고는 대체로 평면형 CDI 노즐과 유사하였다.

4. 결 론

분무연소 및 공정산업 분야에서 많이 사용되고 있는 축소확대 가스유로를 갖는 2유체 미립화 노즐에서의 유동가시화 및 분무특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 솔리렌 사진 가시화에 의하면 초음속 유동길이는 분사가스압력이 높아짐에 따라 유동박리가 일어나지 않는 한 증가하며, 분무는 섬광 순간광원 가시화에 의한 순간적인 내부구조는 불균일할지라도 적사진 가시화한 결과 전체적인 대칭성을 나타냈다.

(2) 일정한 액체공급량에 대해 액적입경 SMD의 공간분포는 반경방향으로 증가하며 분사가스압력이 증가함에 따라 현저히 감소하고 반경방향의 증가도 둔화된다.

(3) 동일한 가스/액체 질량비에서는 액체유량을 증가시킴에 따라 SMD는 감소하며 돌출길이 4 mm인 돌출형 노즐의 미립화효율이 평면형 노즐보다 우수하다.

(4) 분사가스압력이 너무 높으면 유동박리현상이

일어나며, 이로 인해 초음속 유동길이는 짧아지고 분무미립화 효율은 떨어진다.

참고문헌

- (1) Baram, J., 1988, "Pressure Characteristics at the Pour-Tube Orifice in Ultrasonic Gas Atomization," *Materials Science and Engineering*, Vol. 98, pp. 65~69.
- (2) Anderson, I. E., Morton, H. and Figliola, R. S., 1989, "Fluid Flow Effects in Gas Atomization Processing," *Physical Chemistry of Powder Metals Production and Processing*, pp. 229~249.
- (3) Kim, K. Y. and Marshall Jr, W. R., 1971, "Drop-Size Distributions from Pneumatic Atomizers," *AIChE Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 575~584.
- (4) 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.
- (5) Ünal, A., 1989, "Liquid Break-Up in Gas Atomization of Fine Aluminum Powders," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 20B, pp. 61~69.
- (6) Ingebo, R. D., 1988, "Effect of Mass-Velocity on Liquid Atomization in Mach 1 Gasflow," *ICLASS-88*, pp. 97~100.
- (7) Sankar, S. V., Zhu, J. V. and Bachalo, W. D., 1994, "Experimental Studies on the Behaviour of Coaxial Rocket Injector Sprays," *ICLASS-94*, Paper XI-7, pp. 946~953, France.
- (8) Puissant, C., Glogowski, M. and Micci, M. M., 1994, "Experimental Characterization of Shear Coaxial Injectors Using Liquid/Gaseous Nitrogen," *ICLASS-94*, Paper VI-12, pp. 672~679, France.
- (9) 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.
- (10) 정선재, 이상용, 1992, 제한된 공간내 분무의 유동특성 실험, 대한기계학회 논문집, 제16권, 제5호, pp. 1011~1018.
- (11) 노병준, 강선재, 오재하, 1992, 액주형 동축 노즐 분무의 무화특성에 관한 실험적 연구, 자동차공학회지, Vol. 14, No. 5, pp. 41~53.
- (12) 박병규, 이준식, 1997, 외부혼합형 음속노즐을 사용한 2유체 분무미립화의 분무특성, 대한기계학회논문집, 제21권, 제1호.
- (13) 박병규, 이준식, 1996, 초음속 2유체 분무노즐의 유동특성, 대한기계학회논문집, 제20권, 제7호, pp. 2267~2276.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) Care, I. and Ledoux, M., 1991, "Study of an Airblast Coaxial Atomizer: Experiments and Modelisation," *ICLASS-91*, Paper 85, U. S. A.
- (18) Hecht, E., 1987, *Optics*, second edition, Addison-Wesley Publishing Company.
- (19) Saad, M. A., 1993, *Compressible Fluid Flow*, 2nd ed., Prentice Hall.