

횡단유동에 분사된 이류체 분무의 기체 액체비가 분무특성에 미치는 영향

조우진* · 이인철* · 이봉수* · 구자예**

Effect of Gas-liquid Ratio on Characterization of Two-Phase Spray Injected into a Cross-flow

Woo Jin Cho* · In Chul Lee* · Bong Su Lee* · Ja Ye Koo**

ABSTRACT

The effect of two-phase spray injected into subsonic cross-flow was studied experimentally. External-mixing of two-phase spray from orifice nozzle with L/d of 3 was tested with various air-liquid ratio that ranges from 0 to 59.4%. Trajectory of spray and breakup phenomena were investigated by shadowgraph photography. Detailed spray structure was characterized in terms of SMD, droplet velocity, and volume flux using PDPA. Experimental results indicate that penetration length was increased and collision point of liquid jets approached to nozzle exit and distributions of mist-like spray were obtained by increasing air-liquid ratio.

초 록

액체제트의 액적분열 분포특성을 알아보기 위해 아음속 유동 내로 수직 분사된 이류체 분무를 실험적으로 연구하였다. 노즐은 $L/d=3$ 의 외부혼합형을 사용하였으며 공기와 액체의 비를 0 ~ 59.4%까지 변화시키면서 분사하였다. 분무형상을 이미지화 하여 분무의 궤적과 분열특성을 관찰하였다. PDPA를 사용하여 액체제트 분열의 단면분포 특성을 측정하였으며 SMD, 액적속도, 그리고 체적유속을 측정하였다. 이류체 분무로부터 공급되는 공기의 유량이 증가할수록 액체 제트의 충돌점은 노즐 입구와 좀 더 가까워졌으며, 침투거리는 증가하였고, 기체 액체 비를 증가시킴에 따라 좀 더 무화된 액체 제트의 분포를 얻을 수 있었다.

Key Words : ALR(Air to Liquid mass flow ratio), Cross-flow(횡단유동), SMD(Sauter mean diameter), Volume Flux(체적유속)

† 2007년 11월 30일 접수 ~ 2008년 2월 7일 심사완료

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: jykoo@kau.ac.kr

1. 서 론

고성능 터보제트, 램제트 및 스크램제트에서 효율적인 연소와 유해 배기가스를 줄이기 위해서는 연소기내에 분사된 연료와 공기의 혼합, 미립화 그리고 유량이 주된 변수가 된다. 이론적인 연소, 완전한 혼합 및 연료의 미립화 과정에 대한 연소기 내에서의 체류 시간은 공기 흡입식 엔진에서는 매우 제한적이기 때문에 아음속 및 초음속 횡단류 내에서의 분무 미립화 과정 및 분무 영역에 대한 연구는 매우 중요하다.[1] 항공기 및 산업용 가스터빈과 기름 연소로에서의 연료연소부하 조정범위 문제를 해결하기 위해 다양한 형태의 공기 분출식 분무기가 설계되었으며 이는 추가공기의 공급에 의해서 연료와 공기간의 혼합을 양호하게 하여 그을음의 형성을 감소시킨다.[2] 횡단류내로 분사된 분무의 영역은 액주, 액막, 액적 3부분으로 나누어지며, 분사된 액체 제트는 1차분열과 2차분열 과정을 통해 더욱 미립화되며 이는 운동량비(q)와 웨버수에 따라 결정된다.[3] 횡단유동에 액체제트를 분사하였을 때 짧은 시간 동안 액체제트를 분열하기 위해서는 큰 We 수가 필요하다고 하며 공기보조식 액체제트에서는 기존의 단공 노즐보다 더 짧은 시간에 액주의 분열을 발생시킨다고 한다. 또한 액적분포는 말굽모양을 형성하고 이는 액체제트의 상호작용에 의해서 생기며 액체 제트에 공급되는 공기로 인하여 더 깊은 침투 거리와 횡단류 방향에 대한 큰 단면을 나타낸다.[3,4,5]

아음속 및 초음속 횡단류 내에서의 내부혼합형 및 외부혼합형 이유체 분무노즐에 대한 분무 특성 연구는 이미 국외에서 연구되어졌으며 [3,4,5,6] 국내의 경우 외부혼합형 이유체 노즐을 사용한 횡단류 분무의 연구 결과들은 많이 부족한 실정이다.

본 연구는 외부혼합형 인젝터를 사용하여 분사된 액체제트의 공기 대 유량 비를 변화시킴에 따른 액체제트의 액적 분포 특성을 알기 위해 SMD(Sauter mean diameter)와 체적유속을 위상도플러 입자 분석기(PDPA)를 이용하여 측정하였

Table 1. Test environment conditions and nozzle properties

Parameter	Water	Air
Temperature (°C)	20	20
Density (kg/m ³)	998	1.21
Surface tension (N/m)	0.0727	
Orifice diameter (mm)	0.5	
Orifice length (mm)	1.5	

Table 2. Experiment conditions

Parameter	
Fuel flow (g/s) (water)	1.4 ~ 1.7
Airblast flow (g/s) (air)	0.18 ~ 0.88
Airblast velocity (m/s) (air)	186 ~ 389
Air to liquid mass flow ratio ALR (%)	0 ~ 59.4
Crossflow velocity, U_{cross} (m/s)	34.6 ~ 46.1
$Re_L = \frac{\rho_L U_L d}{\mu_L} \times 10^3$	4.37
$Re_{cross} = \frac{\rho_g U_{cross} d_{cross}}{\mu_g} \times 10^5$	2.61 ~ 3.33
Crossflow hydraulic diameter, d_{cross} (mm)	120
$We_{blast} = \frac{\rho_g (U_{blast} - U_L)^2 d}{\sigma_L}$	260 ~ 1252
Two phase jet momentum-flux q_2	35.9 ~ 106.4

고 이미지를 이용하여 미립화 현상을 관찰하고 침투거리를 조사하였다.

2. 실험조건 및 실험장치

2.1 실험가정 및 조건

실험 조건에 대한 물과 공기의 물성치 및 노즐의 기본사양을 Table 1에 나타내었고 Table 2에는 실험조건을 나타내었다. 횡단유동에 액체제트는 90°로 수직하게 분사된다고 하였으며, 실험시 테스트 섹션 내의 온도와 기압 등을 측정하였고 평균온도 293.16K(20°), 대기압 1±0.05atm 에서

실험이 수행되었다. 그리고 액체제트에 작용하는 중력의 영향은 없다고 하였고 또한 횡단유동은 항상 일정하다고 가정하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험은 테스트 섹션 크기가 120 mm(H) × 120 mm(W) × 350 mm(L)인 축류 흡입식 풍동을 사용하였으며 분무형상은 스트로브스코프와 CCD 카메라를 이용하여 가시화 하였다. 그리고 PDPA를 이용하여 SMD와 체적유속을 측정하였다. PDPA의 구성 장치인 수광부와 발진부는 30°를 유지하고 삼 축 이송장치에 고정되어 X/d, Y/d는 2.5 mm씩 분무영역 내에서 이동시켜 측정하였다. 실험장치의 구성의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 횡단 분무의 측정위치는 Z/d=60, 100, 160으로 하였고 액적은 평균 10000개 이상을 측정하여 데이터의 신뢰성을 높였다. 또한 테스트 섹션의 횡단유속은 열선유속계를 사용하여 측정하였다.

인젝터는 외부혼합형으로 fig. 2와 같이 구성되어 있다. 노즐은 L/d=30으로 오리피스는 지름은 0.5 mm, 길이는 1.5 mm로 되어있으며 액체제트는 노즐 출구에서 공기와 충돌하면서 분열을 하게 되어있다. 내부혼합형의 경우 공기와 액체의 혼합은 노즐의 내부에서 발생되는데 비해 외부혼합형 노즐은 노즐 출구에서 바로 혼합이 되므로 그 영향이 더욱 크게 발생된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 횡단유동이 없는 수직분사

인젝터의 분무특성을 알아보는데 우선적으로 횡단유동이 없는 상태에서의 분무 가시화를 통해 분무특성을 고찰해 보았다. 액체제트의 분사 유량은 $m_i = 1.71 \text{ g/s}$ 의 축류 상태를 유지한 채로 ALR을 0 ~ 59.4%로 변화하며 분사하였다. Fig. 3(a)는 ALR 0%일 경우로 안정된 형상을 보이며 곧고 부드럽게 분사가 되는 것을 볼 수가 있지만 ALR 16.8%인 Fig. 3(b)에서는 액체제트가 분사된 출구 앞부분 에서 공기와 액체가

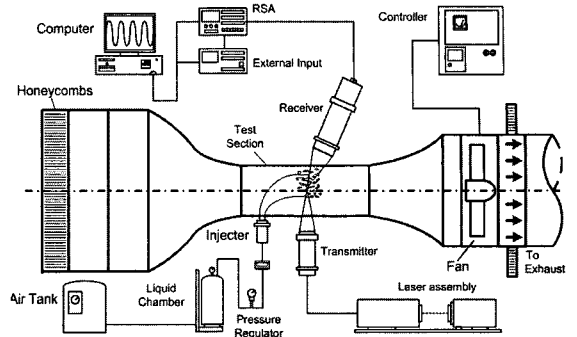


Fig. 1 Schematic of experiment system & suction type wind tunnel

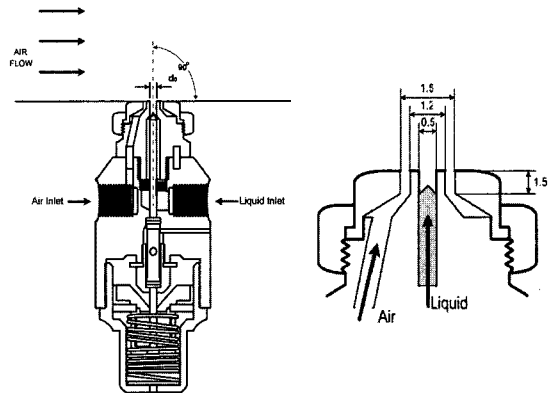


Fig. 2 Schematic of air-assisted injection system

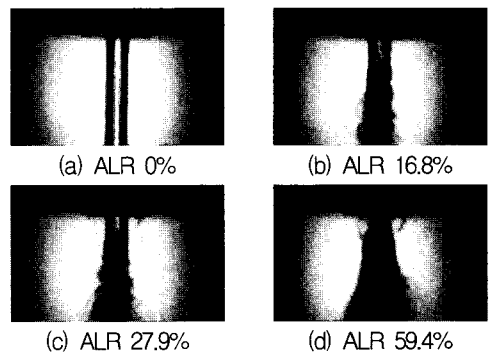


Fig. 3 Photograph images of air-assist spray for variable ALR (0~59.4%) without cross-flow

충돌 하면서 분열이 시작된다. ALR 27.9%인 Fig. 3(c)에서는 더욱 많은 분열을 보이면서 공기와 물이 충돌하여 분열되는 위치가 노즐에서 가까워짐을 볼 수가 있다.

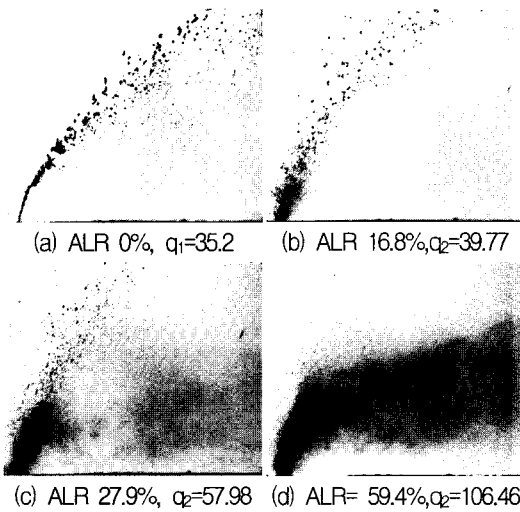


Fig. 4 Photograph images for air-blast liquid jets in subsonic cross-flows ($Re_{cross}=2.61 \times 10^5$, $d=0.5mm$, $L/d=3$)

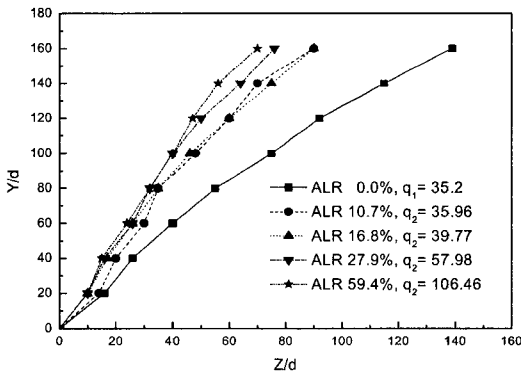


Fig. 5 Trajectories of liquid-jet in cross-flow

ALR 59.4%인 Fig. 3(d)에서는 이유체 노즐 바깥으로 나오는 공기의 유량이 증대되어 상대적으로 중심에서 분사되는 액체 제트와 더욱더 충돌을 가속화하여 미립화를 진행한다. 또한 무화된 미립화 액적들이 분무장 주변에 질게 발생이 되고 공기와 액체가 충돌하여 분열되는 위치가 더욱 노즐에서 가까워짐을 볼 수가 있다.

3.2 횡단유동 속의 수직분사

단공노즐에서 수직 분사된 액체제트는 스스로의 분열은 거의 발생하지 않지만 횡단유동과 만나면 그 운동량에 의해서 분열된다. Figure 4는 횡단유동에 분사되는 액체제트의 ALR을 변화시킨 것을 이미지화하여 나타낸 것이다.

분사유량과 ALR의 비는 0 ~ 59.4%에서 수행이 되었는데 Fig. 4(a)를 보면 ALR 0%로 분사를 하였기 때문에 단공노즐에서 분사된 액체제트는 분사직후 어느 정도의 액주를 형성하고 분열점 이후에 액막과 액적으로 분열하는 과정을 보인다. 하지만 ALR 16.8%로 공기의 비가 높아지면 분사되어진 액체제트는 분사초기부터 분열을 시작하며 분열점이나 액주의 관찰은 불가능해지지만 노즐 출구에서 분사된 액체제트가 초기분열을 하는 것을 볼 수 있다. 그리고 ALR 0% 일 때 분무외각 부분에 보이는 큰 액적들이 분열되어 작아진 것을 거시적으로 확인 할 수 있다. ALR 27.9%로 공기비를 높이면 분무 직후에 분열되어 미세한 입자들이 퍼지는 것을 볼 수가 있는데 ALR 59.4%이 되면 질은 농도의 많은 양의 무화 스트림으로 발달된 것을 관찰할 수 있다. Fig. 5는 분사된 액체제트의 외각궤적을 나타낸 것이다. ALR이 증가할수록 같은 Z/d에서 더욱 많은 관통거리를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 노즐주변에 분사된 공기가 초기에 액체제트를 분열시키지만 외부혼합형 노즐의 형태상 공기의 비가 높아짐에 따라 운동량이 추가되어 관통거리가 높아진다고 분석된다.

단공 노즐에서 횡단류로 분사되는 액체 제트의 모멘텀비(Eq. 1)의 정의와는 다르게 횡단류로 분사되는 이유체 제트의 모멘텀을 얻기 위해 참고 논문 [5]의 q_2 를 인용하였다.

$$q_1 = \frac{\rho_l U_l^2}{\rho_a U_a^2} \tag{1}$$

$$q_2 = \frac{(\rho_l U_L^2 A_{fuel} + \rho_g U_{blast}^2 A_{blast}) / A_{spray}}{\rho_g U_{cross}^2} \tag{2}$$

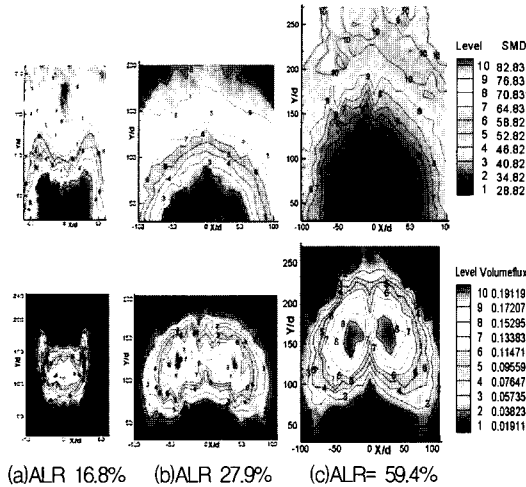


Fig. 6 Contour of SMD and volume fluxes of air-assisted spray. (ALR = (a)10.7%, (b)27.9%, (c)59.4%, $Re_{cross}=2.61(\times 10^5)$, $L/d=3$, $Z/d=60$)

3.3 횡단류에서의 액체 제트 액적분포

횡단류에 분사된 액체제트를 PDPA를 이용하여 측정, 분석을 한 것을 Fig. 6에 나타내었다. ALR을 0 ~ 59.4%까지 변화를 시켰는데 전체적으로 Y/d 가 증가할수록 SMD는 커지는 경향을 볼 수가 있는데 같은 Y/d 에서는 ALR이 증가 할수록 미립화가 더욱 진행된 것을 볼 수 있다. ALR 0% 에서 분포영역이 ALR 27.9%이 되면서 더욱 넓게 퍼졌으며 또한 ALR 59.4%에서는 더욱 많이 미립화된 액적들이 중심부에 많이 존재하는 것을 볼 수가 있으며 미립화 영역도 확장된 것을 관찰할 수가 있다. 이것에서 노즐로 유입된 공기의 비가 커짐에 따라 분열에 더욱 큰 영향을 끼치는 것을 관찰할 수 있고 ALR이 증가할수록 체적유속은 액적분포의 중심부에 더욱 많은 양이 지나는 것을 관찰 할 수가 있는데 ALR 16.8%에서는 전영역이 거의 0.112 cc/s/cm^2 정도로 분포하는 반면 ALR= 59.4%는 중심부에서 체적 유속량 0.191 cc/s/cm^2 를 나타내며, 분무 외곽에서는 적은 양의 체적유속을 관찰할 수 있다. ALR가 16.8% 일 때는 $X/d=\pm 50$, $Y/d= 50 \sim 150$ 정도의 영역을 보였는데 59.4%일 때는

$X/d=\pm 100$, $Y/d= 70 \sim 250$ 의 영역을 보이며 ALR이 증가함에 따라 더욱 많은 영역으로 분열이 되는 것을 볼 수가 있으며 공기의 비가 분열과 분무 영역 확장에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 공기보조식 노즐의 거리별 비교를 위해 $Z/d=60, 100, 160$ 에서 PDPA를 이용하여 측정을 하여 SMD와 체적유속을 3차원으로 나타내었다. 실험은 $Re_{cross}=2.61(\times 10^5)$, $L/d=3$ 에서 진행이 되었는데 Fig. 7(a)는 ALR 0%이고 Fig. 7(b)는 ALR 27.9%이다.

SMD의 그래프를 보면 노즐에서 분사된 액체제트는 Y/d 가 증가함에 따라 SMD가 증가를 하는 것을 볼 수가 있는데 $Z/d=60$ 일 때의 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)의 SMD는 하부에서는 작은 액적의 크기의 차이가 거의 2배정도로 ALR=0%일 때가 큰 액적이 많이 분포하는 것을 볼 수가 있는데 Fig. 7(a)는 $Y/d=120$ 정도까지 측정이 되는 반면 Fig. 7(b)는 액적이 $Y/d=200$ 까지 측정이 되는 것으로 보아 공기가 추가 분사되어 미립화된 액적은 횡단유동에 의해 더욱 작은 액적을 지니지만 이유체 노즐에서 분사되는 공기의 추가적인 충돌이 액적의 관통거리를 증가시키는 것을 알 수 있다. 이렇게 초기에 분사된 액적분포는 $Z/d=60, 100, 160$ 로 증가하여도 액적의 분열은 크게 일어나지 않았으며 단지 초기에 분열된 미립화 정도의 분포영역이 넓게 퍼져서 진행됨을 확인할 수 있다.

체적유속을 보면 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)의 액적분포가 다른 모습을 볼 수 있다. $Z/d=60$ 일 때 Fig. 7(a)의 체적유속을 보면 타원형으로 분포되며 중심부에는 1.58 cc/s/cm^2 로 많은 양이 지나가는 것을 볼 수가 있다. 하지만 같은 Z/d 의 Fig. 7(b)에서는 분포된 영역이 두 영역으로 나뉜 것을 볼 수가 있다. 이것은 횡단유동이 액주를 지남에 따라서 발생된 와류(vortex)의 영향으로 생긴 것으로 여겨진다. 또한 중심부에는 0.19 cc/s/cm^2 를 보이므로 초기의 미립화 되는 정도가 확실히 공기를 분사함에 큰 영향을 받는다는 것을 볼 수가 있다. 분무영역이 확장되는 것도 Fig. 7(a)와

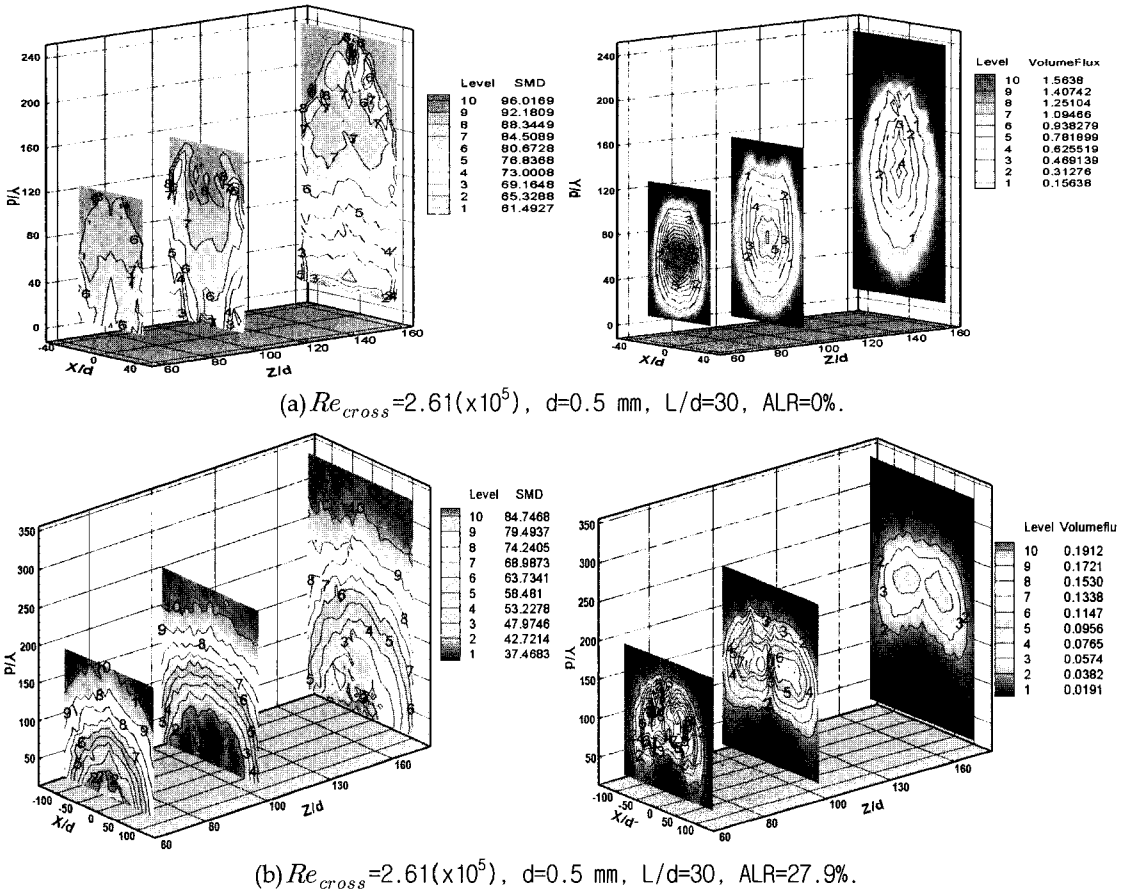


Fig. 7 Total cross-sectional 3D multi-view of SMD and volume flux on external air-assisted spray

Fig. 7(b)에서 보이는 것처럼 ALR=27.9%가 ALR=0%보다 분열영역이 $X/d=100$ 까지 확장되며 2배 이상 넓게 퍼짐을 보인다. 초기에 발달된 분무영역은 Z/d 가 커질수록 넓게 퍼져나가게 되는데 초기 중심부에는 많은 양이 지나갔지만 후에 영역이 넓어지면서 조금의 차이는 있지만 거의 균일한 유량이 지나가는 것을 볼 수가 있다.

4. 결 론

이유체 분무에서 ALR를 변화시키면서 PDPA를 이용하여 SMD와 체적유속을 측정하였으며, 액체제트의 분열을 이미지화 하여 분석하였다. 외

부 혼합형 노즐을 사용하였으며 액체제트는 물과 공기가 혼합되며 ALR 0 ~ 59.4%까지 변화시키면서 실험은 진행되었다.

1. 횡단유동이 없는 곳에서 액체제트의 수직분사에서 ALR이 증가를 할수록 분열되는 위치가 분사지점과 가까워지는 것을 관찰 할 수 있었다.
2. 횡단유동이 있을 때 액체제트를 분사를 시키고 ALR의 비율을 변화시키면서 실험을 하였다. 분사직후 공기와 액체제트의 분열이 생겨 분열점을 찾을 수가 없었으며, ALR이 증가

할수록 공기와의 충돌이 증가하여 미립화가 가속화되었다. 하지만 ALR이 증가 할수록 액체제트의 관통거리가 증가를 하는 모습을 보였는데 이는 공기가 액체제트의 수직방향 운동량을 증가시켰기 때문이다.

3. ALR이 커질수록 SMD의 크기가 작아졌으며, 초기에 분사된 공기에 의해 1차 충돌이 분열영역을 넓게 형성하고 이것이 횡단유동을 만나 2차 충돌을 일으키면서 액적의 미립화를 더욱 진행 시킨다. 그리고 ALR이 커질수록 체적유속의 분포영역은 넓어지고 중심에 집중되는 것을 보였다.
4. 액적의 SMD는 Y/d 가 증가를 할수록 커지는 것으로 관찰이 된다. 또한 횡단유동 방향으로 분열이 진행이 될수록 같은 Y/d 에서는 SMD가 작아지는 것을 알 수 있다. ALR이 클수록 초기 분열이 크게 일어나며 Z/d 가 커질수록 중심부의 체적유속이 작아지면서 분열분포영역이 넓게 확장되는 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원사업(KRF-2007-D00084)의 지원을 받아 수행

된 연구과제임.

참 고 문 헌

1. K. C. Lin, P. J. Kennedy, T. A. Jackson., "Spray Structures of Aerated-Liquid Jets in Subsonic Crossflows," AIAA Meeting & Exhibit, 8-11 January 2001/Reno, NV
2. Gary Boman and K. Ragland, "Combustion Engineering" ISBN 0-07-006567-5
3. K. C. Lin, P. J. Kennedy, T. A. Jackson., "Structure of Water Jets in Mach 1.94 Supersonic Crossflow," 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 5-8 January 2004, Reno, Nevada
4. K. C. Lin, P. J. Kennedy, T. A. Jackson., "Structure Aerated-Liquid Jets in High Speed Cross-flows," 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 24-16 June 2002, St. Louis, Missouri
5. M. Y. Leong, G. Vincent, McDonell, and G. S. Samuelsen, "Mixing of an Airblast-Atomized Fuel Spray Injected a Crossflow of Air," NASA/CR 2000-210467, UCI-ARTR-00-05
6. A. H. Lefebvre, "Atomization and sprays," Taylor & Francis, 1988