

2상 내부 혼합형 노즐분사에서 ALR 변화에 따른 액적의 거동

김규철*·남궁정환*·이상진*·노병준**

On the Behavior of Liquid Droplets Depending upon ALR in Two-phase Internal Mixing Nozzle Jet

Kyu Chul Kim*, Jung Hwan Namkung*, Sang Jin Lee and Byung Joon Rho**

Key Words : Atomization(미립화), Shape Factor(형상계수), Liquid Droplet(액적), PDPA System(위상도플러 입자 분석기), ALR(공기-액체 질량유동율), Half-Width of Spray(분무 반폭), RMS(Root Mean Square)

Abstract

The researches of a two-phase atomizers have been carried out in the field of automotive and aerospace industries in order to improve the atomization performance of the liquid droplets ejecting from these nozzles. The smaller droplets have the advantages of the reduction of environmental pollution matter and effective use of energy through the improvement of heat and mass transfer efficiency. Thus, to propose the basic information of two-phase flow, an internal mixing atomizer was designed, its shape factor was 0.6 and the liquid feeding hole was positioned at the center of the mixing tube which was used to mix the air and liquid. The experimental work was performed in the field after the nozzle exit orifice. The measurement of the liquid droplets was made by PDPA system. This system can measure the velocity and size of the droplets simultaneously. The number of the droplets used in this calculation was set to 10,000. The flow patterns were regulated by ALR (Air to Liquid mass Ratio). ALR was varied from 0.1024 to 0.3238 depending on the mass flow rate of the air. The analysis of sampling data was mainly focused on the spray characteristics such as flow characteristics distributions, half-width of spray, RMS, and turbulent kinetic energy with ALR.

1. 서론

연소기기 및 내연기관의 연소조건을 최적으로 하여 연소 후기에 배출되는 배기가스를 저감시키려는 기술이 한창 개발 중에 있다. 그 중에서도 2유체를 이용한 노즐의 개발이 많은 연구자에 의해서 시도되어지고 있으며, 그에 관한 연구 결과도 많이 발표되고 있다. 지금까지 2유체 노즐의 미립화 성능을 개선하기 위해 연구자들에 의해 수행된 연구로는 노즐의 형상비(aspect ratio, L/d ratio) 변경, 공기와 유체의 혼합 기구 변경 즉, 공기와 유체의 노즐내로의 도입시 선회성분 유/무에 따른 미립화 특성 연구 등이 주로 이루어졌다.

2유체 노즐의 경우, 내부 혼합형 노즐에 대한 미립화 특성 및 난류 유동에 관한 연구는 외부 혼합형 노즐에 관한 자료에 비해 비교적 적은 실정이다. 따라서, 이에 대한 유동 특성 규명, 내부에서의 액적의 분열 메카니즘의 이해 및 모델화, 분열 현상에 대한 물리적인 현상 연구, 노즐 출구 이후의 유동장에서의 거시적 유동특성 현상 규명, 공기 및 유체의 질량 공급율이 난류 특성 및 액적의 미립화 특성에 미치는 영향 연구, 난류강도와 액적의 미립화 등의 상관관계 연구는 절실히 요구되는 분야이다.

Chen 등[1]은 기체주입 노즐을 사용하여 액체의 물리적 성질, 특히 점성, 표면장력 및 주위 공기 압력을 변화시키면서 노즐의 특성을 연구한 바 있다.

Withlow 등[2]은 원형 오리피스형상의 기체주입 노즐을 이용하여 압력형 노즐에 비해 분무콘각이 넓게 얻어진다는 것을 입증했으며, 분무콘각은 작동조건의 변화에 따라서 독립적이라는 것을 보였다.

Santangelo와 Sojka[3]는 내부 혼합형기체주입 노즐을 이용하여 노즐 출구 바로 근방에서의 분무 특성을 FIH(Focused-Image Holography) 기법을 적용하여 연구하였다. 이들은 이전까지의 연구가 주로 노즐 오리피스로부터 약간 떨어진 거리를 대상으로 하여 수행되어 노즐출구 바로 근처에서 일어나는 분무 구조 및 분열과정이 전혀 이해되지 못했다고 생각하였다. 노즐 근처에서의 분무 구조의 명확한 이해는 기체주입 노즐의 미립화 현상을 정확하게 기술하는데 있어 아주 중요하기 때문에 FIH 기법을 활용하여 노즐 근방의 분무 구조에 대한 정성적인 기술을 제공하였다.

Schmidt 등[4]은 공기 보조형 압력 선회 노즐에 대한 연구를 수행하였으며 Malvern 2600 HSD 입자크기 분석기를 사용하여 분무된 액적의 체적-표면적 평균직경과 ALR과의 상관 관계를 분석하였다.

한편, Buckner와 Sojka[5]는 뉴튼유체를 사용하여 고점성 유체의 미립화 특성을 연구한 바 있다. 이 연구에서 측정된 분무 액적의 크기는 ALR = 0.15에서 400-950 cp의 점성을 갖는 유체

* 전북대학교 대학원 정밀기계공학과, 817kcc@intizen.com

** 전북대학교 기계항공시스템공학부, 공업기술연구소, 교수, rhobj@chonbuk.ac.kr

에서 평균 25 μm 였으며, 평균 액적 직경은 ALR에 크게 영향을 받는 반면에 유체의 점성, 유체 공급 압력 및 실험 조건의 범위에서의 혼합 유동율에는 무관하다는 것을 알아냈다.

Whitlow와 Lefebvre[1]는 기체주입노즐의 작동 및 분무 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Ferrerira 등[6]은 기체주입노즐의 성능에 대한 유체의 점성의 영향에 관한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 이상의 연구동향을 기본으로 하여 기체주입노즐의 노즐 출구 이후 유동장에서의 분무 특성을 ALR을 변화시키면서 고찰하였다.

2. 실험장치 및 분무실험

2.1 노즐 제작

실험에 사용된 노즐의 외관 및 주요 제원은 Fig. 1과 같으며, 주요한 구성 부품은 노즐, 혼합관, 외부관 그리고 3개의 공기 공급 구멍이 뚫려 있는 상부커버로 되어 있다. 노즐출구부의 오리피스 직경은 $d=1.6\text{mm}$, $L/d=0.6$ 으로 황동을 이용하여 가공하였다. 특히, 혼합관에서는 유체에 공기가 잘 혼합되도록 혼합관 주위에 24개의 공기 유입 구멍을 0.8mm로 가공하여 유체와 공기의 혼합을 조절하였다.

2.2 실험장치 및 계측시스템의 구성

본 실험을 수행하기 위한 실험 장치의 구성을 Fig. 2에 나타낸다.

공기 압축기에 의해 압축된 공기는 저장탱크 ②에 저장된 후 공기 필터 ③을 통과하여 유량계 ⑥을 통과한 후 미립화기의 혼합실에서 유체(물)에 혼합되도록 공급되며, 이때 유체(물)의 공급은 압력 조절기 ⑦을 지나 유량계 ⑥에서 정확하게 유량이 조절되어 미립화기의 혼합실에서 공기와 혼합된 다음 노즐 출구를 통해서 정지 대기 중으로 분사된다. 특히, 공기 공급관로의 중간에 공기의 공급압력의 부조화에 의한 맥동현상을 방지하기 위해 서지탱크 ④를 설치하였다.

본 실험에 사용된 계측 시스템의 구성은 Fig. 3과 같다.

주요 구성품으로는 source로서 공랭식 Ar-ion laser(750mW) ①이 사용되며, 송광부 ②, ③과 수광부 ④, ⑤로 구성된다. 이때 사용된 송광부 렌즈의 초점거리는 310mm 이며 수광부 렌즈의 초점거리는 600mm 이다. 측정체적은 ⑦에서 형성되며 이 부분을 통과하는 구형의 액적만이 검출되어 유효 데이터로서 축적된다.

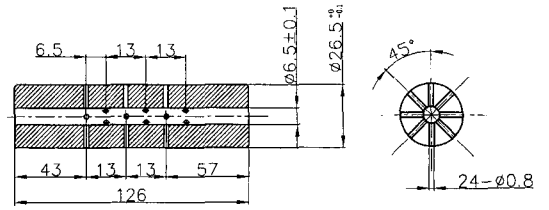
이외에 주요한 측정장비로는 오실로스코프, 신호처리 장치 및 자동 이송장치 ⑧이 있으며, 이들 장치가 진동을 발생하지 않도록 test bench ⑧에 견고하게 고정된 후 실험을 수행하였다.

2.3 분무 실험

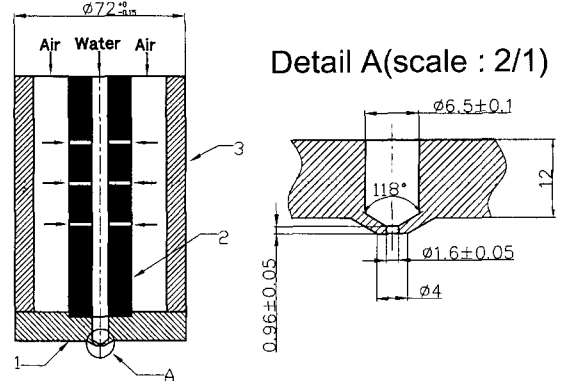
가. 작동유체 실험조건

혼합관에 공급되는 유체(물)의 공급량은 실험시 발생하는 오차를 최대한 줄이고 실험에서 얻어지는 데이터의 정확도 및 신뢰도를 높이기 위해 지금까지의 자체 연구결과 및 참고문헌을 근거하여 1.8g/s로 일정하게 정하여 실험을 수행했다. 이 값은 노즐출구로부터 나오는 액주의 상태 즉, 액주 유동에서의 dripping, 정맥류형 파동(축대칭 파동), 사인곡선형 파동 생성 형태를 고찰해 가면서 많은 실험을 통하여 결정하였다.

ALR비는 물의 공급량이 일정하기 때문에 공기의 질량 유동율의 조건에 맞추어 10가지로 정하였으며, Table 1은 본 실험에 적용된 공기공급 유량, 공기질량 유동율, ALR 등의 실험조건을 나타낸다.

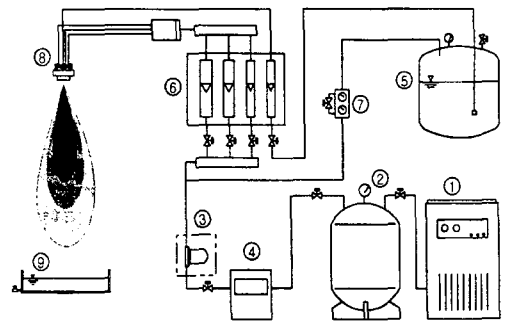


Detail (2)



1. Nozzle 2. Mixing chamber 3. Outer tube

Fig. 1 Nozzle configuration



① air compressor ② air storage & pressure gauge ③ air filter ④ surge tank ⑤ water storage tank ⑥ flowmeter for the air & liquid ⑦ pressure regulator ⑧ nozzle ⑨ spray demister

Fig. 2 PDPA system

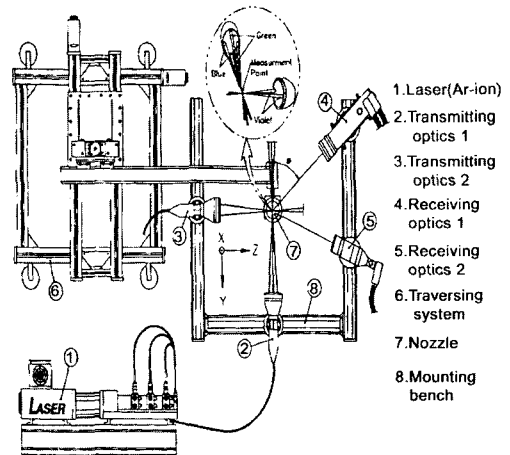


Fig. 3 PDPA system

Table 1 Test conditions

No	공기공급 유량 (bar)	압력 센서 (mA)	공기질량 유동율 $m_a(g/s)$	ALR (m_a/m_l)
1	0.15	3.994	0.2248	0.1256
2	0.2	4.0093	0.2596	0.1448
3	0.3	4.040	0.3180	0.1774
4	0.4	4.071	0.3672	0.2048
5	0.5	4.102	0.4105	0.2289
6	0.6	4.1335	0.4497	0.2508
7	0.7	4.165	0.4857	0.2709
8	0.8	4.196	0.5193	0.2896
9	0.9	4.2267	0.5508	0.3072
10	1.0	4.258	0.5806	0.3238

나. 측정 단면 및 시료수

노즐 선단으로부터 분무 중심축 z 방향(연직하방향)으로 10개의 단면을 선정하여 측정 그리드를 작성하였다. 하나의 단면에서 51개의 점을 측정하도록 측정 프로그램을 작성하였으며, 분무 중심축을 따라서는 액적의 수밀도가 높을 것으로 예상하여 분무 중심축 근방에서는 분무의 가장자리 보다 많은 점에서 액적이 채워 되도록 측정 간격을 조밀하게 선정하여 실험을 진행했다. 측정점당 측정되는 시료 수는 10,000개로 하였으며, 액적의 수밀도가 높아 10,000개의 시료가 검출되지 않을 시는 측정점 당 최대 60초의 측정시간을 상한값으로 설정하여 이 시간이 경과하면 자동으로 다음 측정점으로 이동하도록 조건을 설정했다. 측정점간의 이동은 3차원적으로 자동 이송되는 3차원 Auto Traversing System에 의해 이루어졌으며, 이송 system의 위치 정확도는 $\pm 0.005mm$ 였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무 가시화

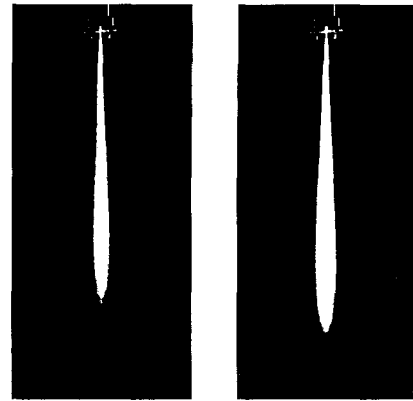
Fig. 5는 분무의 거시적인 특성을 알아보기 위해 ALR=0.1448, 0.2048, 0.2508, 0.2896인 경우의 분무 사진을 나타낸 것이다.

분무 사진은 코닥사의 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였다. 분무내부의 유동영역에서 백색으로 나타나는 부분이 공기 공급 압력이 증가함에 따라 분무 액적의 운동량이 증가되면서 커지고 있음을 알 수 있다. 또 그 폭 또한 약간 퍼지면서 분무 관통부 길이는 ALR=0.2896에 수렴해 가고 있는 것으로 사료된다. 이에 관하여는 Chen 등이 실험을 통하여 ALR이 증가하면 분무관각이 커진다고 발표한 것과 같은 결과이다.

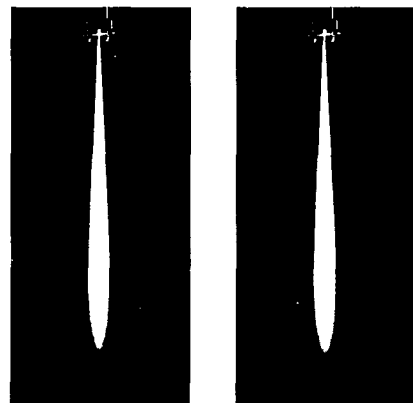
3.2 분무 중심축 방향 RMS

다음 Fig. 6은 분무 중심축 방향에서의 과동속도의 변동 정도를 알아보기 위해 ALR=0.1448의 경우 각 단면에서의 RMS를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 RMS는 각 단면 공히 분무 중심축에서 얻어지고 있으며, 노즐 출구로부터 연직 하방향으로 거리가 멀어지면서 점차로 그 값이 작아지고 있다.

또한, RMS 분포특성은 단순 원형 노즐을 통한 단일 유체 분사의 경우에서 얻어지는 것과 같이 좌우 대칭 구조적인 양상을 보이고 있다.



(a) ALR=0.1448 (b) ALR=0.2048



(c) ALR=0.2508 (d) ALR=0.2896

Fig. 5 Spray visualization

이 속도분포 형상으로부터 알 수 있는 중요한 점은 본 실험에 사용된 노즐이 액체의 미립화를 위해 사용되는 공기가 선회 유동을 하지 않는 내부 혼합형 기체주입 노즐이기 때문에 반경 방향으로의 액적의 운동량이 감소하는 만큼 분무 중심축방향의 속도가 커져 분무 중심축에서의 최대속도가 선회유동에서 얻어지는 값보다 크게 얻어지고 있다고 사료된다.

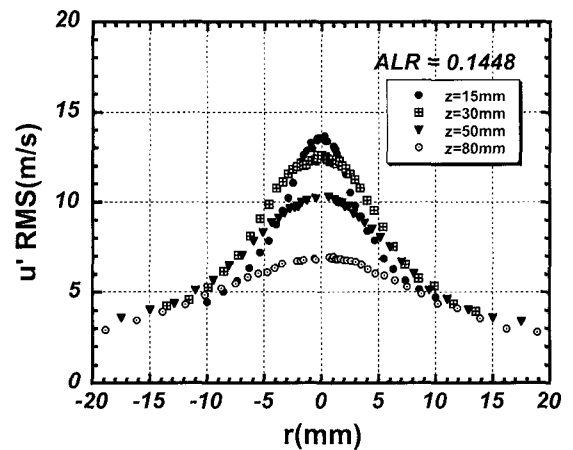


Fig. 6 RMS distributions at each section

3.3 분무 반폭 비교

Fig. 7은 각 ALR에 있어서 노즐 출구로부터의 거리 z 에 따른 분무 반폭 성장 특성을 노즐직경 d 로 무차원화 하여 나타낸 그림이다. 일반적으로 분무 반폭은 분무 중심축 방향의 최대 속도의 1/2 속도에 대응하는 분무 반경방향의 거리를 일컫는다. 각 ALR 공히 z 가 증가함에 따라 분무반폭도 증가하고 있으며, 동일한 단면에서의 분무 반폭은 ALR=0.1448인 경우가 가장 크게 나타나고 ALR=0.2508인 경우가 전반적으로 가장 작게 나타나고 있으나, 0.1440인 경우를 제외하고는 0.2048, 0.2508, 0.2896인 경우 모두, 모든 단면에서의 분무 반폭이 그다지 크게 차이 나지 않고 있는데, 이는 본 실험에 사용된 기체주입노즐의 분무중심축 방향의 속도가 반경방향의 속도크기보다 상당히 커, 그에 따른 운동량이 훨씬 크기 때문으로 사료된다(분무반폭 기울기 $b/z=0.097$).

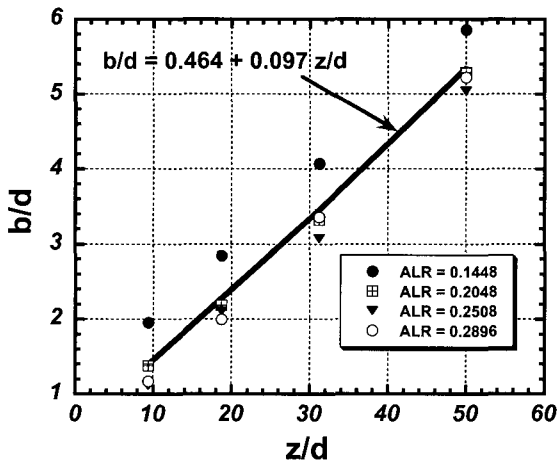


Fig. 7 Half-width of spray at each ALR

3.4 난류운동에너지

Fig. 8은 ALR=0.2508인 경우의 난류운동에너지를 분무중심에서의 속도로 무차원화 하여 나타낸 그림이다. 분무 중심에서의 난류운동에너지가 가장 크게 나타나고 있으며, 노즐출구 오리피스에 가장 가까운 단면이 다른 단면에 비해 상당히 크게 측정되었다. $z=15\text{mm}$ 단면의 경우, 분무 중심의 좁은 영역에서 분무 액적이 측정되고 있으며, 노즐오리시스로부터 분무하방향으로 측정단면이 멀어짐에 따라 분무 중심축을 기준으로 반경방향(r 방향)으로 액적들이 퍼지면서 존재하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 분무 하방향으로 측정 단면이 이동됨에 따라 분무각이 반경방향으로 커진다고 할 수 있다.

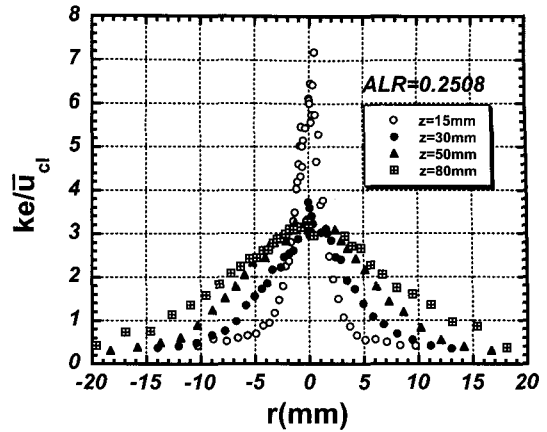


Fig. 8 Turbulent kinetic energy distributions

4. 결론

- 원형 단순 노즐의 단일 유체 분사에서와 같이 분무 중심축에서 최대 RMS가 일어졌으며, 좌우 대칭구조적인 분무가 형성 발달되었고 ALR이 증가함에 따라 분무 관통부의 길이 및 분무 반폭이 증가하였으며, 기울기는 $b/z=0.097$ 로 계산되었다.
- 난류운동에너지는 분무 중심에서 가장 크게 측정되었으며, 노즐출구로부터 측정단면이 분무하방향으로 증가함에 따라 반경방향으로 퍼지면서 작아졌다. 따라서, 분무각은 측정단면의 위치가 커짐에 따라 반경방향으로 증가한다고 볼 수 있다.

참고문헌

- [1] S. K. Chen and A. H. Lefebvre, Spray Cone Angles of Effervescent Atomizers, Atomization and Sprays, vol. 4(1994), pp.270-301.
- [2] J. D. Whitlow and A. H. Lefebvre, Effervescent Atomizers Operation and Spray Characteristics, Atomization and Sprays, vol 3(1994), pp. 137-155.
- [3] P. J. Santangelo and P. E. Sojka, A Holographic Investigation of the Near-Nozzle Structure of an Effervescent Atomizer-Produced Spray, Atomization and Sprays, vol 5(1995), pp. 137-155
- [4] U. T. Schmidt and P. E. Sojka, Air-Assist Pressure-Swirl Atomization, Atomization and Sprays, vol. 9(1999), pp. 173-192
- [5] H. N. Buckner and P. E. Sojka, Effervescent Atomization of High-Viscosity Fluids:Part I Newtonian Liquids, Atomization and Sprays, vol. 1(1994), pp. 239-252.
- [6] M. E. Ferreira, J. C. F. Teixeira, C. J. Bates, and P. J. Bowen, Detailed Investigation of the Influence of fluid Viscosity on the Performance Characteristics of Plain-Orifice Effervescent Atomizers, Atomization and Sprays, vol. 11(2001), pp. 107-124.