

공기 유입을 고려한 2유체 분무의 구조에 관한 실험적 연구

채효철* , 김동일** , 오상현***

An Experimental Study on Structure of Twin-Fluid Spray with Air Entrainment

Chae Hyo Cheol, Kim Dong IL (Graduate School, Pusan National University),
Oh Sang Heun (Professor, Pusan National University)

Key Words: Spray(분무), Air entrainment(공기 유입), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계)
Twin Fluid Nozzle(2 유체 분사 노즐)

Abstract

This paper is investigated the entrainment of air into sprays which has significant effects on the combustion efficiency, stability of flame using the air-assisted twin-fluid nozzle in non-burning. The factors which may be expected to affect the entrainment of air by a liquid spray are: Relative velocity of droplet and ambient gas ; Drop size and size distribution ; Density and other property of the liquid. Here, axial, radial velocity and turbulent kinetic energy of spray droplet was measured with the PIV(Particle Image Velocimetry). Spray characteristics were also visualized using CCD camera. The results indicate that the entrainment rate increases more or less non-linearly with the downstream region.

1. 서 론

공기 유입(entrainment)은 분무가 노즐로부터 분사될 때 분무의 경계를 통해 유도되는 주위 공기의 양으로 정의한다. 이는 미립화용 기체에 의해 분사된 분무 액적으로부터 분무를 둘러싸고 있는 주위 공기로의 운동량 전달의 결과이다. 분무 특성에 대단히 큰 영향을 미치는 공기유입 효과는 실제 분무 시스템에 있어서 중요하다. 가스 터빈과 디젤 엔진과 같은 연소 시스템에서의 공

기 유입은 국소적인 당량비에 큰 영향을 미치고, NOx형성에 직접적인 관계가 있다. 또한, 산업용 노에서의 높은 공기 유입율이 분무의 속도를 감소시켜 노에서 액적의 잔존시간(residence time)에 영향을 미치게 된다. 또한, 공기유입은 많은 공업용용에서 중요한 의미를 가지며 소비재 제품의 스프레이에서 유입된 질량 유동율은 액체 증발의 원인이 된다.

Ricou와 Spalding⁽¹⁾은 일정한 압력하에서 정지한 공기에 다양한 기체(공기, 이산화탄소, 프로판, 수소)를 분사하여 형성되는 난류제트에서 축방향으로의 질량 유동율(mass flow rate)을 측정함으로써 공기 유입율에 대한 모델을 제시하였다.

Briffa와 Dombrowski⁽²⁾는 분무의 내, 외부에 공기를 인공적으로 보내어 유입된 공기 속도를 측정하고 사진 촬영하였다. 그들은 유입된 질량 유동율과 축 방향 거리간의 선형적인 관계를 도출하여 공기 유입 모델을 제시하였다.

MacGregor⁽³⁾는 구형 액적의 항력과 분류(jet fl

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 대학원

*** 부산대학교 기계공학부

ow)의 운동량에 근거한 간단한 모델을 개발하여 Ricou와 Spalding⁽¹⁾의 실험 결과와 비교하였다. 이외에도 여러 연구⁽⁴⁻⁷⁾가 이루어 졌으나 공기 유입의 양을 결정하는 간단한 식을 제시하는데 그치기 때문에 공기유입에 관한 명확한 해석은 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 PIV(Particle Image Velocimetry) system을 이용하여 2유체 분무의 액적 속도, 주위 공기와 액적의 상대 속도로 인해 나타나는 공기유입 현상에 초점을 맞추어 분무의 구조를 규명하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 2 유체 노즐(Twin Fluid Atomizer)은 3개의 유리와 1개의 블랙판으로 구성된 4각형 덕트속에서 분사되며 입자의 정체로 인한 오차를 막기 위해 환풍기가 설치된다. 분무의 속도분포와 가시화를 위한

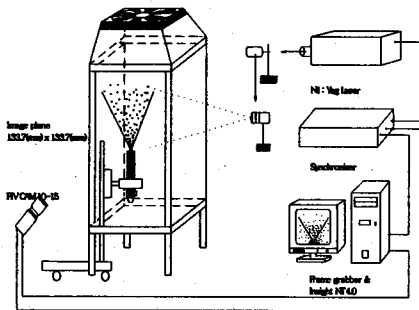


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table1. Specifications of PIV system

Laser Source	Nd : YAG
Wave Length(nm)	532
Laser Power(mJ/pulse)	200
Beam thickness(mm)	2.5
PIV Camera(pixel)	1,024 × 1,024
Frame interval(μs)	54.9, 60.1
Interrogation section(pixel)	32 × 32 (with 50% overlap)

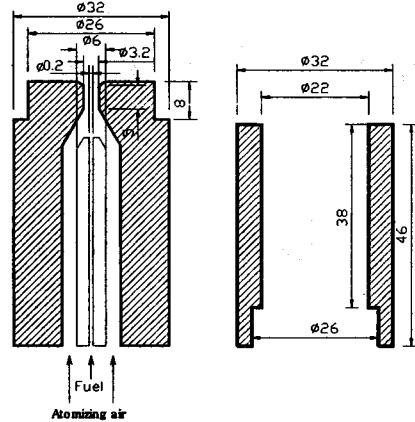


Fig.2 Twin fluid atomizer and flame holder

PIV 시스템은 이중 펄스 방식의 Nd : YAG 레이저, CCD 카메라 등 이들을 제어하기 위한 동기화 장치(TSI 610032)와 컴퓨터로 이루어진다. 구성품의 주요 제원은 Table.1에 나타내었다.

본 실험에서의 PIV 측정영역의 크기는 133.72 × 133.72 mm이며, 속도 벡터의 추출은 2화상 상호상관 기법(Two Flame Cross-Correlation)을 이용하였다. 이때, 두 프레임 사이의 시간 간격은 조건 A와 B는 54.9 μs, 조건 C는 60.1 μs이고, 탐색 영역(Interrogation window)의 크기는 32 × 32 pixels, 중첩 면적의 크기는 50%로 설정하였다. 레이저 조사 시간은 4 ns 정도로 CCD 카메라의 노출시간에 맞추었다. 구해진 속도 벡터는 후처리 프로그램으로 불량 벡터의 제거, 1000장의 앙상블 평균 등의 통계적 수행을 하였다.

Fig. 2는 2유체 분사 노즐로 분사 직경은 φ 3.2mm, 전체 직경은 32mm이며 연료와 공기의 공급계가 따로 구분되었다. 화염의 안정화를 위해서 보염기(Flame holder)가 설치되고, 비연소시 수직 상 방향으로 분사하여 측정하였다.

2.2 실험 조건

Table.2은 본 실험에서 사용한 실험 조건을 나타

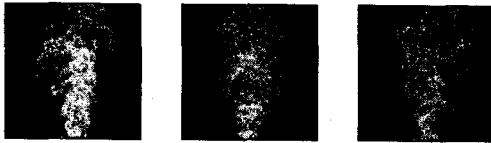
Table 2. Experimental conditions

Condition	A	B	C
Fuel(cc/min)	21	21	21
Air(l/min)	32	29	25

낸 것으로서 연료는 등유(Kerosene)를 사용하였으며 일정한 연료량에 미립화 공기량을 3가지로 변화시켜 가며 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무 가시화



(a) Condition A (b) Condition B (c) Condition C

Fig.3 Image of spray structure with increase of atomized air quantity

Fig.3은 미립화 공기량에 따라 분무 형태와 공기 유입 현상을 밝히기 위해서 CCD 카메라를 이용하여 가시화한 것이다. 미립화 공기량이 많은 조건 A는 조건 B, C에 비해 액적의 크기가 작아 분무 경계내에 고루 분포하고 있음을 볼 수 있다. 그리고, 조건 A, B, C의 분무 경계부근에서 노즐의 특성과 공기유입 상으로 인한 large scale의 주름(winkle)상을 관찰할 수 있다.

3.2 분무 구조

Fig.4는 미립화 공기량이 가장 많은 조건 A의 1000개의 순간 속도장을 평균한 결과이다. 노즐 선단 부근에서의 미립화 영역은 액막이 분열되어 미소한 안정된 액적을 형성하고 이러한 액적은 미립화 공기에 의하여 가속되는 영역이다. 실험 결과를 보면 약 10 mm 이내가 미립화 영역임을 알 수 있다. 이 영역에서 주위 공기는 빠른 액적의 속도에 의해 유입되고 있음이 속도 벡터의 분포로서 알 수 있다. 하류로 갈수록 노즐 출구로부터 직접 비행하여 오는 운동량이 큰 액적으로 구성되는 중심 영역과 유입되는 주위 공기의 영향이 크게 작용하는 외주 영역으로 구성된다.

Fig.5는 각 조건에서 노즐 선단으로부터 거리 $z=20$ mm 단면에서 반경방향에 따른 액적의 축방향 평균속도를 나타낸다. 액적의 축방향 평균속도는 노즐 선단의 빠른 공기의 속도분포가 큰

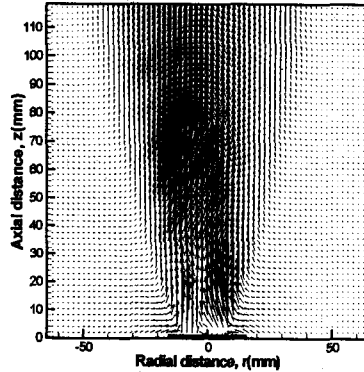


Fig.4 The ensemble averaged velocity field(Condition A)

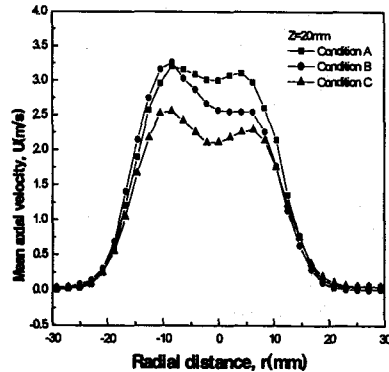


Fig.5 Distribution of mean axial drop velocity with non-burning spray($Z=20$ mm)

영향을 미치므로 축 방향 중심에서 반경방향으로 감소하는 전형적인 제트의 속도분포를 나타내어야 한다. 그런데 실험결과는 축 중심에서 낮은 쌍봉 형태를 나타내는데 이는 노즐 선단 부근에서의 너무나 조밀한 입자분포를 PIV 시스템이 포착하지 못했기 때문으로 여겨진다. 그러나, 비교적 밀도가 낮아지는 $z=50$ mm, 100 mm 단면에서는 전형적인 제트형 속도분포를 나타내고 있다.

Fig.6은 각 조건에서 노즐 선단으로부터 거리 $z=20$ mm 단면에서 액적의 반경 방향 평균속도를 나타낸 것이다. $z=20$ mm 단면에서 $r=-24$ mm, $+21$ mm 바깥부근에서 반경 방향 속도가

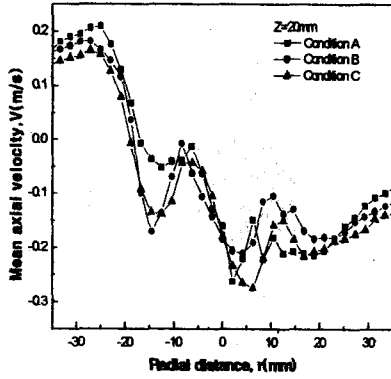


Fig.6 Distribution of mean radial drop velocity with non-burning spray(Z=20mm)

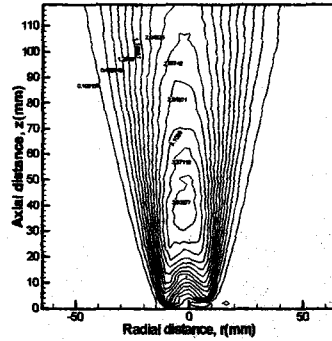


Fig.8 Contours for the ensemble averaged axial drop velocity field(Condition A)

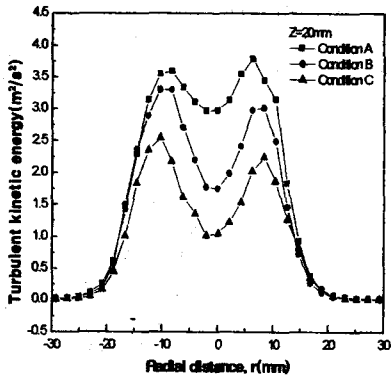


Fig.7 Distribution of turbulent kinetic energy with non-burning spray(Z=20mm)

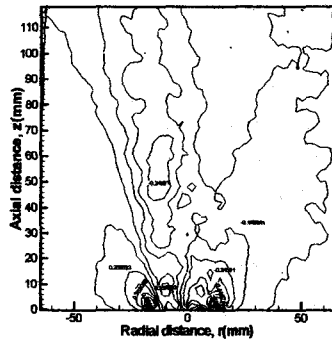


Fig.9 Contours for the ensemble averaged radial drop velocity field(Condition A)

감소하다 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 주위 공기가 분무 경계 내로 유입되고 있음을 나타내고 있다. $z=30\text{mm}$, 50mm , 100mm 단면에서 기류의 유입속도는 조건 A에서 크게 나타나고, 축 방향으로 갈수록 기류속도는 작아지고, 유입되는 범위는 넓어짐을 볼 수 있다.

Fig.7은 각 조건에서 노즐 선단으로부터 거리 $z=20\text{mm}$ 단면에서 액적의 난류 운동 에너지를 나타낸 그래프이다. 난류 운동 에너지의 최고치는 액적의 축 방향 속도분포와 비슷한 쌍봉형태를 가지고, 중심축에서 보다 낮은 값을 가지고 있다. 이는 분무의 양 경계에서의 공기 유입이 많이 이루어지기 때문에 난류운동이 활발히 일어나고 있음을 보여준다. 그리고, $z=30\text{mm}$,

50mm , 100mm 단면으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig.8은 순간 축 방향 속도장을 전체 평균한 그림이다. 노즐 선단($z=0\text{mm}$)에서 축 방향으로 갈수록 가장 큰 속도 분포를 가져야 하지만 노즐 출구에서 빠른 입자의 속도와 액적의 크기로 인해 입자 추적이 따라가지 못한 것으로 보인다. 그러나, $z=30\text{mm}$ 단면이상에서는 축 방향, 반경 방향으로 멀어질수록 속도가 작아지는 경향을 볼 수가 있다.

Fig.9는 순간 반경 방향 속도장을 전체 평균한 그림이다. Fig.4의 양상을 평균한 속도장과 비교하여 보면, 노즐 선단 부근에 주위 공기유입으로 인해 속도 분포가 크게 나타나고 있다. 축 방향

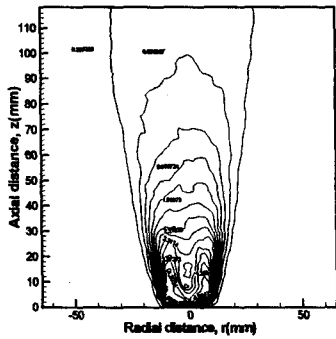


Fig.10 Contours for the turbulent kinetic energy(Condition A)

속도와 마찬가지로 축 중심에서 멀어질수록 액적의 운동량 감소로 작아지고 있다.

Fig.10은 난류 운동 에너지를 나타낸 그림이다. 이 전 단면에 걸친 난류 운동 에너지의 분포를 Fig.7과 비교해 보면 분무의 양 측면에서 난류 운동이 왕성하며, 노즐 선단부근에서 보다 활발해짐을 볼 수 있다. 이러한 난류 운동은 하류로 갈수록 작아지고, 100 mm 단면이상에서는 거의 0에 가까워지고 있다.

3.3 공기 유입 측정

PIV를 이용하여 분무의 속도 벡터를 Fig.4와 같이 구하였다. 주위 공기의 유입 속도를 구하기 위해 분무 외각에 측정선을 결정하였다. 그리고 측정선상의 속도 벡터 중 축 방향 성분이 거의 0인 속도를 주위 공기의 유입 속도로 취급하였다. 위의 가정은 액적의 크기를 알 수 없기 때문에 선택한 방법이다. 따라서 실제 공기 유입 속도에 비해 어느 정도의 오차는 있으나, 분무 내로 유입되는 정성적인 유입량의 측정에는 큰 문제가 없다고 생각한다.

그래서 분무 외부의 비 난류 영역을 선택하여 위치한 측정선 상의 속도 벡터를 공기 유입 속도의 측정점으로 삼았다. 축 방향 위치에 따른 국부적인 공기 유입율(entrainment rate)을 다음의 식으로 계산하였다.

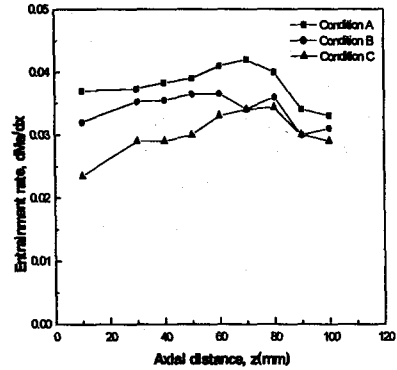


Fig.11 Variations of entrainment rates with the axial distance

$$\frac{dM_e}{dx} = 2\pi\rho r_{ei}v_{ei} \quad (1)$$

여기서, r_{ei} : 유입을 식이 적용되는 영역의 위치
 v_{ei} : 경계위치 r_{ei} 에 가장 근접한 곳에서 측정한 유입속도
 ρ : 공기의 밀도

Fig. 11은 각 조건에 대해서 식(1)에서 구한 공기 유입율을 축 방향에 따라 도시하였다. 미립화 공기량이 가장 많은 조건 A가 공기 유입율이 가장 크고, 조건 C가 가장 낮은 유입율을 나타내고 있다. 또한, 각 조건에서의 유입율은 축 방향으로 비선형적으로 증가하다가, 80 mm 단면 이후에서는 다소 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은 기류의 속도가 하류에서 급격히 감소하여 분무 외각의 작은 입자들이 기류에 편승하지 못하여 유입률이 감소한 것으로 보인다.

4. 결론

PIV를 이용하여 2 유체 분무의 공기 유입 현상과 분무 구조를 실험적으로 고찰하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 속도 벡터를 통해 2 유체 분무의 구조는 노즐 선단 부근의 미립화 영역, 중심부 영역, 그리고, 외주 영역으로 구성되어 있었다.

- ② 공기의 유입이 노즐 선단 부근에서 활발히 일어나는 것을 액적의 반경 방향 속도와 난류 운동 에너지 분포를 통해 알 수 있었다.
- ③ 분무 경계면을 따라 유입되는 공기 유입율의 측정 결과에서 축 방향을 따라 비선형적으로 증가하다가 80 mm 단면 이후부터는 공기 유입이 감소하였다.

참고문헌

- (1) Ricou, F.,P.,R. and Spalding, D.B., "Measurement of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets," J. of Fluid Mech., Vol.51, pp.773~779, 1961
- (2) Briffa, F.E.J., and Dombrowski, N., "Entrainment of Air into a Liquid Spray," AIChE J., pp.708~717, 1966
- (3) MacGregor, S.A., "Air Entrainment in Spray Jets," Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol.12, pp.279~283, 1991
- (4) Boysan, F. and Binark, H., "Predictions of Induced Air flow in Hollow cone Spray," J. of Fluids Engineering, Vol.101, pp.313~318, 1979
- (5) Sutherland, I.J., Sojka, P.E. and Plesniak, M.W., "Entrainment by ligament Controlled Effervescent Atomizer-Produced Sprays," Int. J. Multiphase Flow Vol.23, No.5, pp.865~884, 1997
- (6) Ruff, G.A., Sagar, A.D. and Faeth, G.M., "Structure and Mixing Properties of Pressure-Atomized Sprays," AIAA J., Vol.27, No.7, pp.901~908, 1989
- (7) S.H. Park and H D. Shin, "Measurements for entrainments characteristics of swirling jet," Int. J. Heat Mass transfer. Vol.36, No.16, pp.4009~4018, 1993
- (8) 김동일, 오상현, "2유체 분무 액적의 거동에 관한 실험 및 수치해석 연구", 한국액체미립학회지, 제3권, 제4호, pp.63~71, 1998