

고속기류에 분사된 액적궤적 및 입경분포에 미치는 주위 기체밀도의 영향

The effect of gas density on the drop trajectory and drop size distribution in high speed gas stream

이 충 훈*
C. H. Lee

ABSTRACT

High velocity, gas-assisted liquid drop trajectories were investigated under well-controlled experimental conditions at elevated gas densities and room temperature. A monodisperse stream of drops which are generated by a vibrating-orifice drop generator were injected into a transverse high velocity gas stream. The gas density and air jet velocity were adjusted independently to keep the Weber numbers constant. The Weber numbers studied were 72, 148, 270, 532. The range of experimental conditions included studied the three drop breakup regimes previously referred as bag, stretching/thinning and catastrophic breakup regimes. High-magnification photography and conventional spray field photographs were taken to study the microscopic breakup mechanisms and the drop trajectories in high velocity gas flow fields, respectively. The parent drop trajectories were affected by the gas density and the gas jet velocities and do not show similarity with respect to the either Weber or the Reynolds number, as expected.

주요기술어: liquid drop(액적), drop distortion (액적 변형), drop trajectory(액적궤적), gas density(기체밀도), drop size(액적 크기)

기호 설명

C_d	drop drag coefficient
D	drop diameter
r	radius
R	nozzle inlet radius
Re	Reynolds number, $2\rho_g U d / \mu_g$
U	relative velocity
We	Weber number, $2\rho_g U^2 d / \sigma_L$
X	radial coordinate
Y	axial coordinate
μ	dynamic viscosity
ρ	density
σ	surface tension

1. 서론

디젤엔진, 가솔린엔진, 가스터빈엔진, 로켓엔진 등은 액체 연료를 연소하여 동력을 얻는다. 이러한 엔진의 연소 효율 및 배출물에 큰 영향을 미치는 인자로는 액적의 증발 특성, 연료 산화제 혼합 특성, 액적의 공간적 분포 특성 등이 있다.

분무거동을 정확하게 이해하기 위해서는 분사된 액적의 분열거동 및 궤적을 상세하게 파악하여야 한다. 액적의 분열과정을 통한 액적의 미립화 과정에 의하여 분무의 전체 표면적이 증가하게 되므로 액적의 미립화 과정은 분무의 증발 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 액적의 궤적은 분사된 액적의 운동량,

*정회원, 서울산업대학교 자동차공학과

액적에 미치는 항력, 액적과 주위 기체사이의 상호 작용 등에 의하여 영향을 받는다. 이러한 액적의 미립화 메커니즘에 대한 정확한 정보는 분사 시스템의 성능 최적화에 중요하며 액적의 궤적에 관한 정보는 분무의 컴퓨터 모델링에 중요한 역할을 한다.

액체 연료와 주위기체 상호간의 상대 속도를 증가시킴으로써 액적의 미립화를 촉진시킬 수 있는데 이와 관련된 연구는 Chigier and Reitz⁽¹⁾, Lefebvre⁽²⁾ 등에 의해 수행 되었다. 미립화 과정에 관한 기초적인 연구는 Krzeczowski⁽³⁾, Pilch and Erdman⁽⁴⁾, Hsiang and Faeth⁽⁵⁾, Wu and Faeth⁽⁶⁾, Gelfand⁽⁷⁾ 등에 의해 수행되었다.

액적의 공간적 분포를 얻기 위해서는 액적의 궤적에 관한 정보가 필요한데 이러한 정보는 액적에 미치는 항력의 특성을 파악함으로써 가능하다. 액적에 작용하는 항력은 액적의 가속도에 영향을 미치고 그에 따라 액적의 속도 및 액적의 공간적 위치에 영향을 미치게 된다. Liu 등⁽⁸⁾ 과 Hwang 등⁽⁹⁾ 은 고속 기류에서의 액적의 미립화 과정과 액적궤적에 대하여 연구를 수행한 바 있다. Liu 등⁽¹⁰⁾ 은 고속 기류에서의 액적 미립화 및 궤적에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 연구를 하였다.

한편, 고속 기류에서의 액적의 미립화 과정 및 궤적에 관한 그 동안의 연구는 주로 대기압 조건에서 이루어 졌으며 주위 기체의 밀도 변화에 따른 고속 기류 속의 액적의 미립화 및 컴퓨터 시뮬레이션은 Lee 와 Reitz^(11,12) 에 의해 최근에 수행된 바 있다.

본 연구에서는 주위 기체 밀도가 액적 궤적에 미치는 영향을 액적에 대한 간단한 운동 방정식을 이용하여 계산하였고 이를 실험 데이터와 비교하였으며 입경 및 속도 분포도 측정하였다.

2. 실험

2.1 궤적 실험

실험 장치는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 분무실, 액적 발생기, 광원,기체 노즐, 카메라 등으로 구성되어 있다. 액적 발생기와 고속 기체 노즐로부터 각각 분사되는 액적과 고속기체제트의 운동 방향이 크로스플로우

(crossflow) 조건이 되도록 각각을 Fig.2 와 같이 설치하였다.

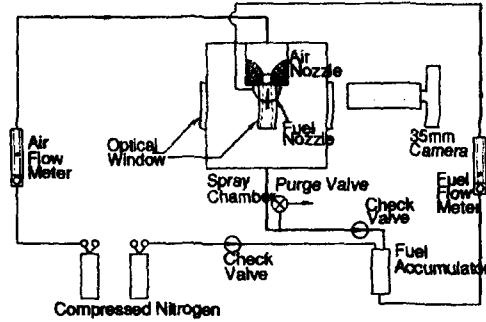


Fig. 1 Schematic diagram of the optical arrangement.

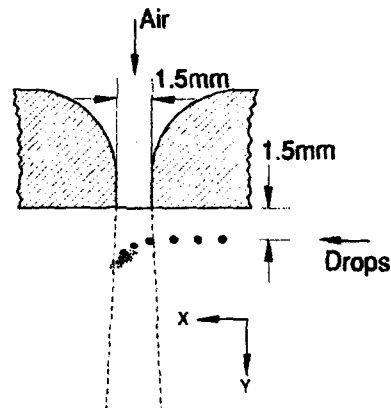


Fig. 2 Schematic Diagram of showing drop breakup with the transverse gas jet.

기체 노즐 출구 직경 1.5 mm 의 원형 노즐이며, 기체 제트의 출구에서의 속도 분포가 균일한 분포를 가지도록 노즐 출구부에 R=5 mm 의 라운드를 주었다. 기체제트의 출구 속도를 균일하게 만듦으로써 유동의 경계층의 영향을 최소화할 수 있으며 액적이 순간적으로 고속 유동에 노출될 수 있도록 한다⁽⁸⁾. 기체유량은 면적유량계를 사용하여 제어하였다. 액적의 분사 압력과 분무실압력 간의 압력차가 일정하게 유지될 수 있도록 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 2 개의 체크밸브와 1 개의 퍼지밸브를 사용하였다.

Table 1 Summary of the Experimental Conditions.

	Weber number, $We = \rho_g U^2 d / \sigma_L$	Spray chamber pressure, P_b (MPa)	Density of gas ρ_g (kg/m ³)	Velocity of gas jet, U (m/sec)	Reynolds Number $Re = \rho_g U d / \mu_g$
1	72	0.10	1.2	82	990
2	72	0.37	4.3	42	1889
3	72	0.64	7.5	32	2492
4	72	0.85	9.8	28	2871
5	148	0.10	1.2	118	1425
6	148	0.37	4.3	61	2744
7	148	0.64	7.5	46	3582
8	148	0.85	9.8	40	4102
9	270	0.10	1.2	159	1920
10	270	0.37	4.3	82	3688
11	270	0.64	7.5	62	4829
12	270	0.85	9.8	54	5538
13	532	0.10	1.2	223	2693
14	532	0.37	4.3	115	5173
15	532	0.64	7.5	87	6776
16	532	0.85	9.8	76	7795

Bergund-Liu⁽¹³⁾의 고안에 의해 일정직경이면서 일정한 간격으로 분사되는 액적을 발생시키는 압전소자 액적발생기를 사용하였다. 액적 발생기 노즐 오리피스 직경은 100 μm 이며 이로부터 생성된 액적 직경은 184 μm 이다. 액적분사압과 분무실압력의 차이는 275 kPa 로 일정하게 유지하였으며 이러한 조건에서 액적의 분사 속도는 18 m/s 이다.

연료는 Benz oil UCF-1 를 사용하였으며 연료물성치는 SAE J967d, ISO 4113 규격에 따른다. 연료의 점성은 0.00217 Ns/m², 밀도는 840 kg/m³, 표면장력 0.02 kg/s², 인화점은 348 K, t-90 증류점은 483 K 이다.

실험은 Table 1. 에 나타낸 바와 같이 16 개의 조건에 대하여 실시되었다. We 수에 따라 4 개의 분열 영역 즉, 백분열(bag breakup), 전단층 분열 (shear layer breakup), 스트레칭 /thinning 분열 (stretching /thinning), 혼돈분열 (catastrophic breakup)⁽¹⁴⁾ 에 대하여 주위 기체 밀도를 4 가지로 변화시킴으로써 16 개의 실험조건을 만들었다. 기체 물성치에 기초한 $Re = \rho_g U d / \mu_g$ 값도 Table 1. 에 나타내었으며 이

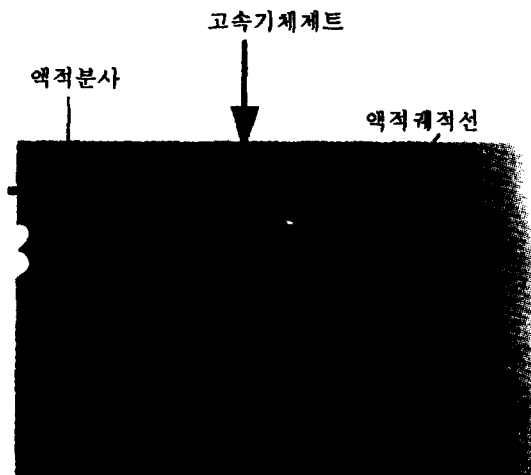


Fig. 3 Photograph of drop trajectory with gas jet velocity and density 1.2 kg/m³ and 82 m/s, respectively. Drops enter from left

같은 기체제트에 의해 액적표면에 형성되는 경계층 특성을 나타낸다. 액적 궤적 촬영을 위한 가시화 광원으로는 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 레이저 슈트빔을 얻기 위해 실린더형 구형(cylindrical and spherical) 렌즈를

사용하였다. He-Ne 레이저시트빔을 만들어 카메라의 렌즈방향과 직각방향으로 입사하도록 하여 90° 방향의 액적궤적 산란신호가 카메라에 잡히도록 하였다. Fig. 3 은 주위기체 밀도 1.2 kg/m³, 고속기체제트 속도 82 m/s 조건에서 가시화한 예이다.

2.2 액적 속도 및 직경측정

액적의 2 차 분열 후 입경 분포 및 속도 분포를 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) 를 사용하여 측정하였다. Aerometrics 사의 1-D PDPA 시스템이며 모델명은 RCV-2100-5 이다. 광원부 레이저는 He-Ne 레이저이며 광원부 렌즈의 초점거리는 500 mm 이다. 수광부는 광원부 축방향으로부터 30° 빗저선 방향에 설치되었으며 수광부렌즈의 초점거리는 500mm 이다.

3. 결과 및 검토

3.1 액적 속도 분포 및 입경분포

Fig. 4 는 분열 액적의 공간적 분포 특성을 가시화하기 위하여 백열 전등을 광원으로 사용하고, 대기압 조건에서 4ms 동안 필름을 노출시켜 찍은 것으로 분무의 공간적 분포 특성을 잘 보여주고 있다. 여기서 원으로 표시한 부분은 PDPA 측정점적의 위치를 나타낸 것이다. 기체노즐출구로부터 수직하방 12 mm 위치에서 수평방향으로 3 mm 씩 이동하면서 입경 및 속도분포를 측정하였다.

Fig. 4 에서 표시한 위치에서의 유동장의 속도 분포를 Fig. 5 에 나타내었다. 공급된 기체 유량으로부터 계산된 기체 노즐 출구에서의 평균제트 속도를 82 m/s, 118 m/s, 159 m/s, 223 m/s 로 점차적으로 증가시켰을 때 수직 하방 속도를 측정한 결과이며 이 때 분무실 압력은 대기압 조건이다. 각각의 제트 속도는 기체 노즐 중심부에서 속도가 가장 높고 중심축에서 멀어지면서 속도가 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 노즐 중심축에서의 속도만을 보면 대체로 노즐출구에서의 제트 평균속도의 1/2 정도의 값으로 감소되었음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 Fig. 4 의 원으로 표시한 위치에서의 SMD (Sauter mean diameter) 이다.

측정 위치에 따른 입경 분포가 기체제트출구 속도가 223 m/s 인 경우를 제외하면

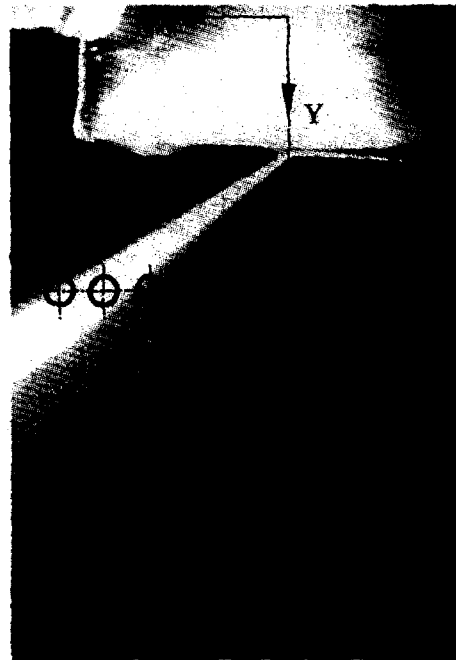


Fig. 4 Location of measurement point for drop velocity and size.

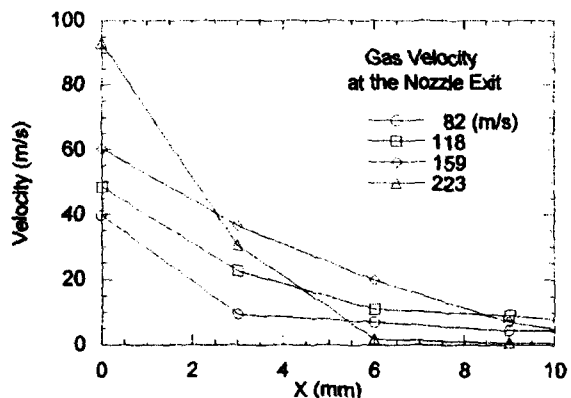


Fig.5 Velocity distribution at gas density 1.2 kg/m³ with the four gas velocities 82, 118, 159 and 223 m/s, respectively.

대체적으로 노즐 중심축에서 벗어나 x 값이 증가할수록 SMD 값이 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 액적발생기에 의해 분사된 부모액적(parent drops)이 고속 기류에 들어가게 되면 고속기체제트에 의하여

작은 크기의 액적이 떨어져 나가게 되며 이 작은 액적은 부모 액적에 비해 주위 기체 유동에 의해 상대적으로 쉽게 가속화되는 경향을 가지게 되기 때문이다. 즉 액적의 직경이 작을수록 액적이 수평방향으로 침투하는 길이가 감소하는 경향을 띠게 되며 작은 액적들이 상대적으로 기체노즐 중심축에 가까운 위치에 존재하게 되고 이로 인해 기체노즐 중심축에서의 SMD 값이 상대적으로 작은 값을 가지게 된다⁽⁸⁾.

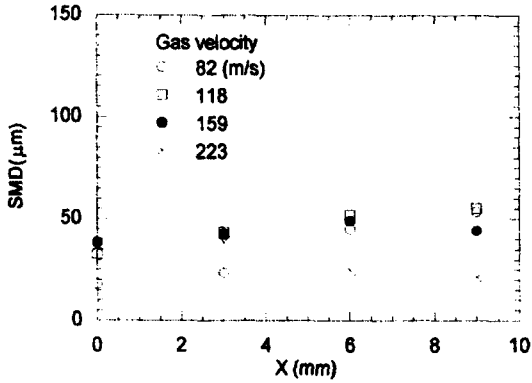


Fig. 6 SMD distribution from PDPA, with gas density 1.2 kg/m³ and the four gas velocities 82, 118, 159 and 223 m/s, with a corresponding Weber number 72, 148, 270, 532, respectively.

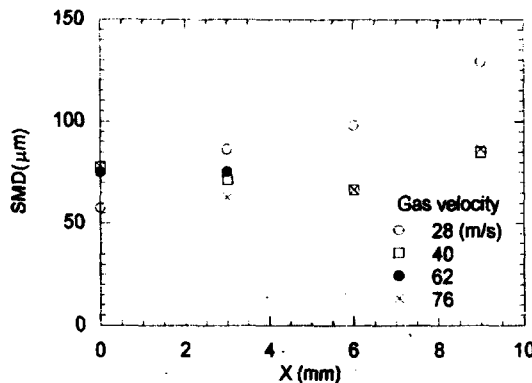


Fig. 7 SMD distribution from PDPA, with gas density 9.8 kg/m³ and the four gas velocities 28, 40, 62 and 76 m/s, with a corresponding Weber number 72, 148, 270, 532, respectively.

기체노즐 출구 속도가 223 m/s 에서 x 값에 따른 SMD 값이 대체적으로 일정한 값을 나타내고 있는데 이는 기체 제트의 속도가 매우 높기 때문에 부모 액적이 기체 유동장에 들어 가자 마자 매우 빠르게 미립화 되기 때문이다.

주위 기체 밀도가 9.8 kg/m³ 인 경우에 대해서 Fig. 6 과 동일한 We 수 (72, 148, 270, 532) 가 되도록 각각의 기체 제트의 속도를 28, 40, 62, 76 m/s 로 제어한 조건에서 x 값에 따른 SMD 분포를 Fig. 7 에 나타내었다. SMD 분포의 경향은 앞서의 밀도가 1.2 kg/m³ 인 경우에 유사한 경향을 보이고 있으며 Fig. 6 의 설명과 같은 이유로 이러한 경향을 설명할 수 있다. 밀도가 1.2 kg/m³ 인 경우와 비교하여 전체적으로 SMD 값이 큰 값을 나타내고 있는데 이는 기체제트의 속도가 상대적으로 작은 값을 가지기 때문이며, 이것은 액적의 미립화에 미치는 효과가 동일한 We 수일 때 주위 기체 밀도의 영향보다는 액적 기체 상호간의 상대속도의 영향이 더 크게 미친다는 것을 의미한다.

3.2 액적 궤적

액적의 변형은 그 액적에 미치는 항력에 큰 영향을 미치며 따라서 그 액적의 궤적에 영향을 미치게 된다⁽¹⁴⁾. 액적의 운동방정식은 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_L V_d \frac{du}{dt} = C_D A_r \frac{\rho_g U^2}{2} \{U/U\} \quad (1)$$

여기서 u 는 액적의 속도, U 는 액적과 주위기체의 상대속도, ρ_L 은 액적밀도, ρ_g 는 기체 밀도이다. V_d 는 $4\pi r^3/3$ 이고 A_r 는 πr^2 로 표시되며 각각 액적의 체적 및 단면적이다. C_D 는 액적의 항력계수이다. 대부분의 분무모델을 적용하는데 있어서 액적레이놀즈수 $Re = \rho_g U d / \mu_g$ 는 충분히 크기 때문에 Stokes 의 항력 법칙에 따른 항력계수에 대하여 보정이 필요하다. 액적을 변형이 없는 구(solid sphere)로 가정하고 구한 항력계수는 액적 레이놀즈수의 관계식(2)로 나타낼 수 있다.

$$C_{D,S} = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2.3} \right) \quad Re \leq 1000 \quad (2)$$

$$C_{D,S} = 0.424 \quad Re > 1000$$

액적의 진동 및 변형이 항력계수에 미치는 영향은 Liu 와 Reitz⁽⁸⁾, Liu 등⁽¹⁰⁾ 에 의해 연구되었으며 Liu 등⁽¹⁰⁾ 은 O'Rourke 와 Amdsen⁽¹⁵⁾ 이 제시한 TAB 모델을 이용하여 액적 변형관련 계수 y' 을 계산한 바 있다. 액적의 변형을 고려한 항력계수는 액적의 변형계수 y' 을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$C_D = C_{D,S}(1 + 2.632y') \quad (3)$$

여기서 $y'=0$ 일 때는 강체구로 볼 수 있고, $y'=1$ 일 때는 완전한 디스크 형태의 액적형상을 갖는 다는 것을 의미하며 이 때의 항력계수는 강체구의 항력계수 값의 3.6 배의 값을 가지게 된다. Ibrahim 등⁽¹⁶⁾ 의 DDB 모델을 이용하여 Liu 와 Reitz⁽¹⁴⁾ 는 액적변형모델을 제시하였다.

주위 기체와 상호 작용하는 액적들의 궤적으로부터 액적의 항력계수 및 액적의 분열매카니즘에 관한 정보를 얻을 수 있다. 액적의 궤적은 35 mm 카메라와 He-Ne 광원을 이용하여 가시화함으로써 얻을 수 있으며 가시화 영역은 기체노즐 출구 바로 아래 부분 10 mm × 10 mm 영역이며 Fig. 3 에 액적궤적을 구한 예를 나타내었다. Fig. 3 에서 실선으로 표시한 부분이 액적궤적선인데 궤적선상에는 주로 부모 액적이 존재한다고 보았다. 즉, 부모 액적이 고속 제트와 만나면 표면에서 작은 액적이 분열되어 나가고 분열 액적은 질량이 작으므로 주위 기체 유동에 대한 추종성이 좋다. 이에 반해 큰 액적(부모액적)은 주위기체 유동을 이기고 먼 곳(액적궤적선)까지 날아가게 된다.

Table 1 에 나타낸 Re 수 계산값은 대체로 $Re > 1000$ 을 만족하며 식(2)로부터 항력계수 값은 Re 수에 무관하게 결정됨을 알 수 있다. 따라서 액적의 궤적은 액적-주위기체의 밀도 및 그 상대속도에 의존하게 된다. 이는 액적 We 수가 액적의 변형에 영향을 미치며 수식으로 나타내면 $y'=y'(We)$ 로 나타낼 수 있고 점성효과는 무시할 수 있다⁽¹⁰⁾.

만일 액적이 기체 유동장에 들어서자마자 디스크형상으로 변형된다고 가정하면 식(1)은 식 (4)의 형태로 정리된다.

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho_G U^2}{\rho_L r} = 0.54 \quad (4)$$

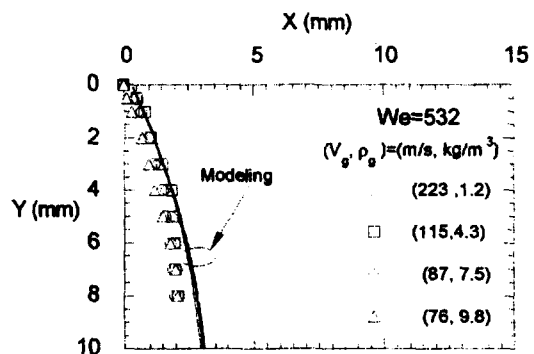


Fig. 8 Comparisons of the measured and the predicted trajectories for Weber number 532

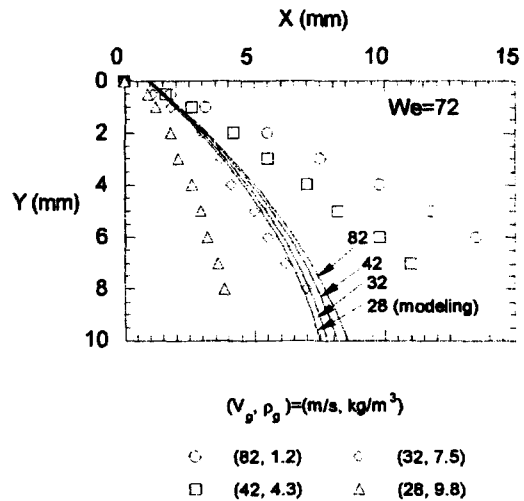


Fig. 9 Comparisons of the measured and the predicted trajectories for Weber number 72.

Fig. 8 과 9 는 액적궤적의 가시화 결과와 식(4) 에 의한 모델링 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 8 은 We 수가 532 인 경우이고 앞서서 가정된 높은 레이놀즈수에서의 액적이 디스크형상으로 변형되었다는 가정이 잘 맞는 것을 보여주고 있으며 액적궤적의 가시화 실험결과와 모델링결과가 잘 일치하고 있다. 그러나 Fig. 9 에서 나타낸 바와 같이 We 수가 72 인 경우에는 실험결과와 모델링결과가

큰 차이를 보이고 있다. We 수가 작은 경우에는 액적이 주위기체 유동과의 상호작용이 크게 줄어들게 되고 주위기체 밀도가 작은 경우에는 액적이 기체제트를 완전히 통과하게 된다.



Fig. 10 Photographs of bag breakup of drops in gas jets whose velocity and density are, respectively (a) $(1.2 \text{ kg/m}^3, 82 \text{ m/s})$, (b) $(4.3, 42)$, (c) $(7.5, 32)$ and (d) $(9.8, 28)$, respectively⁽¹¹⁾.

주위기체 밀도 및 제트 속도가 각각 1.2 kg/m^3 , 82 m/s 일 때 액적의 거동을 확대렌즈로 가시화 결과⁽¹¹⁾를 Fig. 10a 에서 볼 수 있는데 액적이 기체 제트를 통과할 때 변형이 디스크형으로 변형되지 않고 있는 것을 보여주고 있으며 이로 인해 실험결과와 모델링의 잘 맞지 않는 결과를 가져왔다. 기체 밀도가 9.8 kg/m^3 , 제트 속도가 28 m/s 인 경우에는 수직하방으로 크게 치우쳐 있음을 볼 수 있는데 이는 부모 액적이 분열과정을 통하여 질량을 잃게 되고 주위 기체밀도가 크기 때문에 액적이 수평방향으로 침투하는데 용이하지 않게 되며 그에 따라 액적이 수직하방으로 크게 치우치는 결과를 가져온 것이다.

4. 결론

액적발생기로부터 일정크기 및 일정간격으로 액적을 고속 기류에 분사하여 액적의 속도, 입경분포, 변형 그리고 궤적 등을 실험 및 모델링을 통하여 연구하였다.

액적의 미립화촉진 효과에 있어서 동일한 We 수일 때 주위기체 밀도보다는 액적과 기체 상호간의 상대속도가 더 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

액적의 변형이 액적에 미치는 항력에 영향을 미치며 그에 따라 액적의 궤적에 영향을 미쳤으며 We 수가 큰 경우에는 액적의 궤적을 모델링하는데 있어서 액적의 모양을 디스크형태로 가정함으로써 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. Chigier, N. A. and Reitz, R. D., 1996, "Regimes of jet breakup of and breakup mechanisms," In *Progress in Astronautics and Aeronautics*, ed. K. Kuo, Vol. I, pp. 109-136.
2. Lefebvre, A. H., 1989, "*Atomization and Sprays*," Hemisphere, New York.
3. Krzeczowski, S. A., 1980, "Measurement of liquid droplet disintegration mechanism," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 6, pp. 227-239.
4. Pilch, M. and Erdman, C. A., 1987, "Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 13, pp. 741-757.
5. Hsiang, L. P. and Faeth, G. M., 1992, "Near limit drop deformation and secondary breakup," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 19, pp. 635-652.
6. Wu, P. K. and Faeth, G. M., 1993, "Aerodynamic effects primary breakup of turbulent liquids," *Atomization and Sprays*, vol. 3, pp. 265-289.
7. Gelfand, B. E., 1996, "Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 27, pp. 201-265.
8. Liu, A. B. and Reitz, R. D., 1993, "Effects of drop drag and breakup on fuel sprays," *Atomization and Sprays*, vol. 3, pp. 55-75.
9. Hwang, S. S., Liu, Z. and Reitz, R. D., 1996, "Breakup mechanisms and drag coefficients of high speed vaporizing drop" *Atomization and Sprays*, vol. 6, pp. 353-376.
10. Liu, A. B., Mather, D. and Reitz, R. D., 1993, "Effects of drop drag and breakup on fuel sprays," *SAE paper 930072*.

11. Lee C. H. and Reitz R. D., 2000, "An Experimental Study of the Effects of Gas Density on the Breakup Mechanism of High Speed Liquid Drops," *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 26, pp. 229~244.
12. Lee, C. H. and Reitz R. D., 1999, "Modeling the Effects of Gas Density on the Drop Trajectory and Breakup Size of High-Speed Liquid Drops," vol. 9, pp. 497~517.
13. Berglund, R. N. and Liu, Y. H., 1973, "Generation of monodisperse aerosol standards," *Exp. Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 147~153.
14. Liu, Z. and Reitz, R. D., 1996, "An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops," *International J. of Multiphase Flow*, vol. 23, pp. 631~650.
15. O'Rourke, P. J. and Amsden, A. A., 1987, "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE paper 870289.
16. Ibrahim, E. A., Yang, H. Q. and Przekwas, A. J., 1993, "Modeling of spray droplets deformation and breakup," *AIAA J. Propulsion and Power* vol. 9, pp. 651~654.