

충돌제트로 생성되는 분무의 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of the Spray Produced by Two Impinging Jets

강 보 선*, D. Poulikakos**
B. S. Kang

ABSTRACT

In this paper an experimental study of a spray created by two impinging jets is presented utilizing a novel two-reference-beam double-pulse holographic technique. Visualization of the overall spray pattern as well as measurements on the size and velocity of the droplets were performed with the special emphasis on the effect of physical properties of liquids. The overall spray pattern clearly revealed the inherent wave nature in the disintegration process of this type of atomization. The structure of liquid elements near the impingement point is indicative of the mechanisms of the disintegration process. Surface tension plays an important role in the droplet size without any noticeable effect on the spray pattern, whereas viscosity affects the structure without any significant effect on the droplet size. The droplet velocities were not affected by liquid properties.

주요기술용어 : Impinging Jet Injector(충돌제트인젝터), Double Pulse Holography(이중 펄스 홀로그래피), Two Reference Beam(이 기준광), Rocket Engine(로켓 엔진), Liquid Ligaments(액띠).

1. 서론

액체 연료를 사용하는 로켓 엔진의 인젝터(injector)에는 크게 샤워헤드형 분사기(shower head injector)와 유동 충돌형 분사기(impinging-streams injector)가 있으며, 제작의 단순성 및 우수한 혼합 특성으로 인하여, 유동 충돌형 분사기의 일종인 충돌 제트 인젝터(impinging-jet injector)가 많이 이용되고 있다[1].

충돌 제트 인젝터는 Fig. 1에 나타낸 것처럼, 고속의 두 개의 액주(liquid jet)가 서로 충돌하면서, 그 충돌의 힘에 의하여 액체를 미립화시

키는 노즐이다. 서로 충돌하는 두 액주는 각 액주의 속도가 낮을 경우는 두 액주를 포함하는 평면에 직각인 평면에, 나뭇잎 모양의 액막이 형성된다. 각 액주의 속도가 액체의 미립화를 위해 충분할 정도로 증가되면, 액막이 형성되었던 같은 평면에 선행 분무(fan spray)가 형성된다. 즉, 두 액주의 충돌점 주변에는 조그만 부채꼴 모양의 액막이 형성되고, 그 하부로는 호(arc) 모양의 액띠(liquid ligaments)가 형성된다. 이 불안정한 액띠는 하류로 진행하면서 수 많은 액적으로 부서지게 된다. 이러한 형식의 인젝터에 의해 형성되는 분무의 특성을 좌우하는 주요 인자들은, 충돌 전 액주의 특성(충류 또는 난류), 각 액주의 속도 V_j , 오리피스스의 직경 D_j , 분사 각도(두 액주 사이의 각도) 2θ ,

* 전남대학교 기계공학과

** Swiss Federal Inst. of Technology

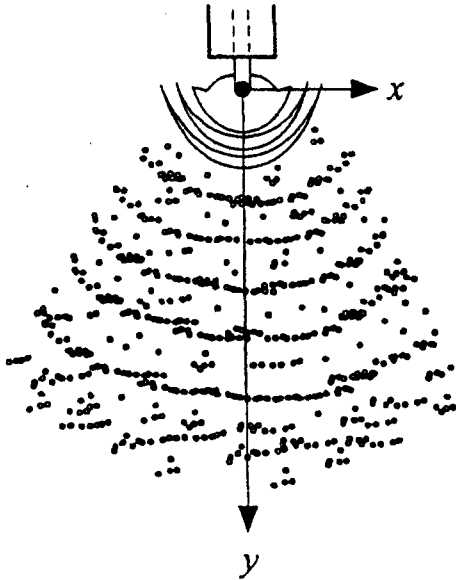


Fig. 1 Schematic Diagram of a Spray Formed by Two High-Speed Impinging Jets.

오리피스 출구에서 충돌점까지의 거리 L_j , 분무 환경 및 분무 액체의 물리적 성질 등 매우 다양하며, 그로 인하여 실제 형성되는 분무의 미립화 메카니즘은 매우 해석하기가 어려운 복잡한 특성을 보여주고 있다.

충돌 제트에 의해 형성되는 분무의 특성에 대한 지금까지의 연구는 실험적으로는 전체적인 분무패턴에 대한 연구[2, 4, 5], 액막의 분열 메카니즘에 대한 연구[2, 5], 액막분열길이에 대한 측정[2, 3, 6], 액적의 크기 및 속도의 측정[3-7], 그리고 액막분열 길이 및 액적의 크기에 대한 이론적 해석[6] 등으로 분류할 수 있다. 국내에서는 박성영 등[8]에 의해 Triplet 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구, 이충훈 등[9]에 의한 충돌제트의 유량분포 및 혼합특성에 관한 연구 등이 수행되었다. 하지만, 로켓 엔진에서의 연소 특성을 이해하는 데, 가장 기본적인 출발점이 되는 연료 분무에 대한 지금까지의 연구는, 아직도 양적, 질적으로 미흡한 형편이다. 특히, 로켓 엔진 연소에서 나타나는 연소 불안정성(combustion instability) 문제는, 그 원인이 액체 연료와 산화제의 분무와 혼합특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 간주되고 있지만,

아직까지 그 실체가 명확히 밝혀지고 있지 않다.

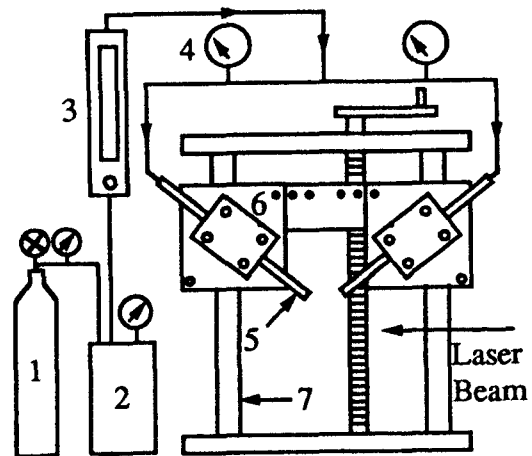
본 연구에서는 Kang[10]에 의해 개발된 이중 펄스에 의한 액적 이미지 분리가 가능한 홀로그래피 방법을 이용하여, 액체의 물성치가 충돌 제트에 의하여 형성되는 분무의 특성에 미치는 영향 및 액적 직경의 공간적 분포 특성에 대하여 살펴보았다.

2. 실험 장치

본 연구의 실험장치는, 분무를 생성하는 충돌제트 시스템, 생성된 분무를 녹음, 재생시키는 홀로그래피 시스템, 그리고 액적 이미지로부터 액적의 크기 및 속도를 측정하는 이미지 처리 시스템으로 구성되어 있다. 실험장치에 대한 보다 자세한 설명은 Kang[10]을 참조하기 바란다.

2.1 충돌제트 시스템

서로 충돌하는 충돌제트 시스템이 Fig. 2에 나타나 있다. 보다 안정된 액체의 공급을 위하여, 고압의 질소에 의하여 가압되는 액체저장



- 1. N₂ Gas Cylinder 5. Glass Tube
- 2. Pressurized Liquid Tank
- 3. Flowmeter 6. Rotation Stage
- 4. Pressure Gauge 7. Height Carrier

Fig. 2 Experimental Apparatus

용기로부터 액체가 유량계와 압력계를 거쳐 오리피스로 공급된다. 본 연구에 사용된 오리피스는, 정밀하게 가공된 유리로써, 길이는 15.24 cm이고, 내경은 1.016 mm이다. 두 액주 사이의 각도는 90°이며, 오리피스 출구로부터 충돌점까지의 거리는 10.0 mm로 유지되었다. 액주의 충돌전 속도는, 측정 유량과 오리피스 직경으로부터 추정된 액주의 속도가 실제 측정된 액주 속도와 일치함을 보여 준 Foster et al.[3]의 연구 결과를 근거로 유량을 측정, 계산되었으며, 7.0 ~ 20.0 m/s로 변화되었다. 액체 물성치의 영향을 살펴보기 위하여, 물, 에탄올, 글리세롤 수용액을 사용하였으며, 사용 액체들의 대기압, 20°C에서의 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 괄호 안의 값은 각 액체물성치의 물에 대한 비율을 나타낸다. 에탄올의 표면 장력은 물의 약 1/3이며, 농도 68% 글리세롤 수용액의 점도는 물의 약 20 배까지 증가되었다.

Table 1 Physical Properties of the liquids at 20°C and 1 atm

Liquid	ρ (kg/m ³)	$\mu \times 10^3$ (N s/m ²)	$\sigma \times 10^3$ (N/m)
water	998 (1.00)	1.00 (1.00)	72.88 (1.00)
ethanol	791 (0.79)	1.20 (1.20)	22.80 (0.31)
gly	50%	1125 (1.13)	6.05 (6.04)
ce	59%	1150 (1.15)	10.25(10.23)
rol	68%	1174 (1.18)	19.40(19.36)
			67.72 (0.93)

2.2 홀로그래피 시스템

생성된 분무의 전체 패턴과 액적의 직경 및 속도 측정을 위하여 Fig. 3과 같은 두 방향의 기준광을 이용하는 이중 펄스 홀로그래피 시스템을 사용하였다. 이 시스템의 특징은, 각 펄스마다 방향이 다른 두 기준광을 이용함으로써, 홀로그램 재생(reconstruction)시, 각 펄스에 해당되는 입자 이미지를, 각각 재생시킬 수 있게 된다. 따라서, 각 펄스에 대한 이미지를 완전히 분리시킴으로써, 중첩에 의한 복잡성, 속도 방향 판별의 어려움 등을 해소시킨 시스템이라고 볼 수 있다. 본 홀로그래피 시스템에 대한 자세한 설명은 강보선[11]을 참조하기 바란다.

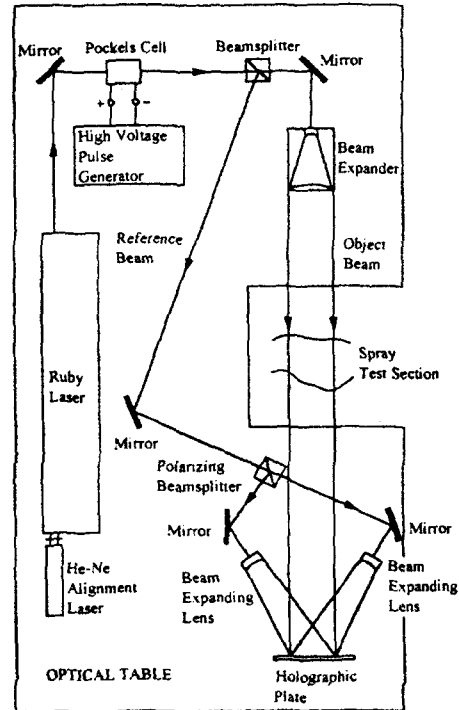


Fig. 3 Recording System of Double Pulse Holography with Two Reference Beams.

2.3 이미지 처리시스템

인화지에 인쇄된 액적이미지는, CCD 카메라에 의하여 컴퓨터에 입력되어, 이미지 처리시스템에 의하여 액적의 면적 및 이동거리 등이 측정되고, 이로부터 액적의 크기 및 속도가 계산된다. 데이터 모집 위치는 여섯 점이며, 분무 중심축상의 두 위치(액적이 부서져 액적이 생기기 시작하는 위치, y=4.0 cm와 그 곳으로부터 $\Delta y = 2.5$ cm인 지점)에서, x축상으로 중심(x=0) 및 좌, 우($\Delta x = \pm 2.5$ cm) 세 위치에서 측정하였다. 한 위치에서의 모집 면적은 $\Delta x \times \Delta y = 1.0 \times 1.5$ cm이다.

3. 실험결과

3.1 분무패턴

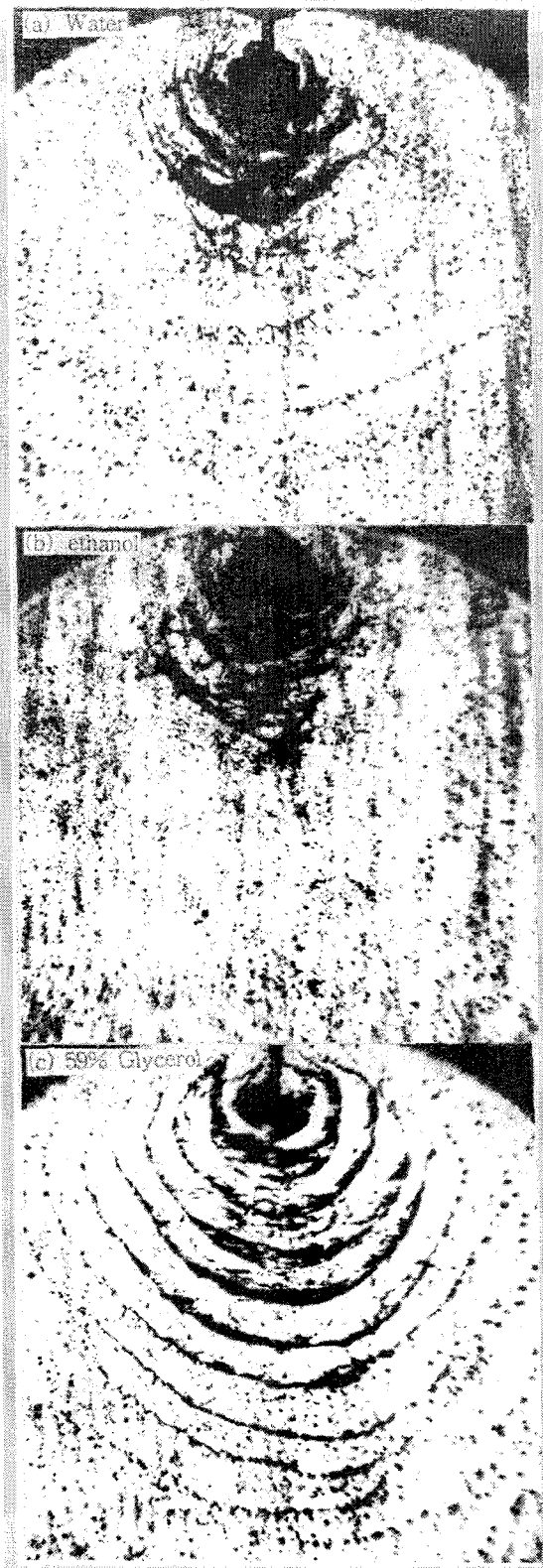


Fig. 4 The Overall Spray Pattern

Fig. 4 (a)는 $D_j = 1.016 \text{ mm}$, $2\theta = 90^\circ$, $V_j = 12.0 \text{ m/s}$, 사용유체 물인 경우의 분무 홀로그래프로부터 촬영한 사진으로써, 고속으로 충돌하는 두 액주에 의하여 형성되는 분무의 전체 패턴 및 전형적인 액막의 분열 과정을 보여 주고 있다. 전체적인 분무 패턴은, 마치 두 액주의 충돌점을 중심으로 하여 전파되는 파동 특성을 보여 주고 있는데 이는 점도가 높은 글리세롤 수용액의 경우 더욱 두드러지게 나타나고 있다(Fig. 4c). 액막의 분열 과정을 보면, 두 액주의 충돌점 바로 주변에는 조그만 부채꼴 모양의 액막이 형성되고, 그 하부로는 중심에서 가장 두껍고 양 옆으로 갈수록 가늘어지는 호(arc) 모양의 액띠(liquid ligament)가 액막으로부터 분리되어 형성된다. 이 불안정한 액띠는 하류로 갈수록 가늘어 지면서, 결국에는 수 많은 액적으로 부서지게 된다.

Fig. 4 (b), (c)는 Fig. 4 (a)의 분무 조건과 같고, 사용유체가 각각 에탄올과 59% 글리세롤 수용액인 경우로써, 액체의 물리적 성질이 전체 분무패턴에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 표면장력의 영향을 보기 위해 사용한 에탄올의 경우, 전체 분무 패턴은 물의 경우와 비교해 큰 차이점을 보이지 않고 있다. 이는, 표면 장력이 물의 절반인 Varsol을 이용하여 관찰한 Heidmann et al.[2]의 결과와도 일치하고 있다. 반면에, 사진상으로는 액적의 크기를 비교하기가 어렵지만, 3.2절에서 설명되는 액적 직경을 보면, 에탄올의 경우, 생성되는 액적 직경에는 큰 영향을 미치고 있다.

액체의 점도는 미립화 과정에 여러 가지 요인으로 영향을 미치며, 일반적으로, 점도가 높아질수록 액체 표면에 발달되는 불안정한 파동을 감쇠시키는 작용을 하기 때문에, 액체의 분열을 지연시키고, 형성되는 액적의 크기도 커지게 된다. 점도가 물의 10배 정도로 증가한 글리세롤 수용액의 경우는, 사용유체가 물이나 에탄올인 경우, 수 많은 액적만이 존재하는 하류지역까지, 액적으로 분열되지 않은 액띠가 존재하고 있는, 큰 차이점을 보여 주고 있다. 이는 높아진 유체의 점도로 인하여, 액막으로

부터 분열된 액적이 하류로 진행해 가면서 액적으로의 분열이 물과 같이 신속히 진행되지 않은 결과이다. 또한, 이 액적들은 어느 정도 동간격을 유지함으로써, 마치 두 액주의 충돌 점을 원점으로 전파되는 파동처럼 보이고 있다. 이러한 특성은 Fig. 4에 보인 물의 경우에도, 액적이 분열되는 위치에 액적이 밀집되어 있는 것으로도 확인할 수 있다. 따라서, 충돌 제트에 의해 형성되는 분무의 전체 패턴은 사용 유체의 표면 장력에 의해서는 영향을 받지 않고, 점도에 의해 크게 변화된다고 볼 수 있다.

3.2 액적직경

Fig. 5는 $D_j = 1.016$ mm, $2\theta = 90^\circ$ 일 때, 물, 에탄올, 글리세롤 수용액 등을 사용하여, 액체의 물리적 성질이 분무의 평균직경에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 물과 세 종류의 글리

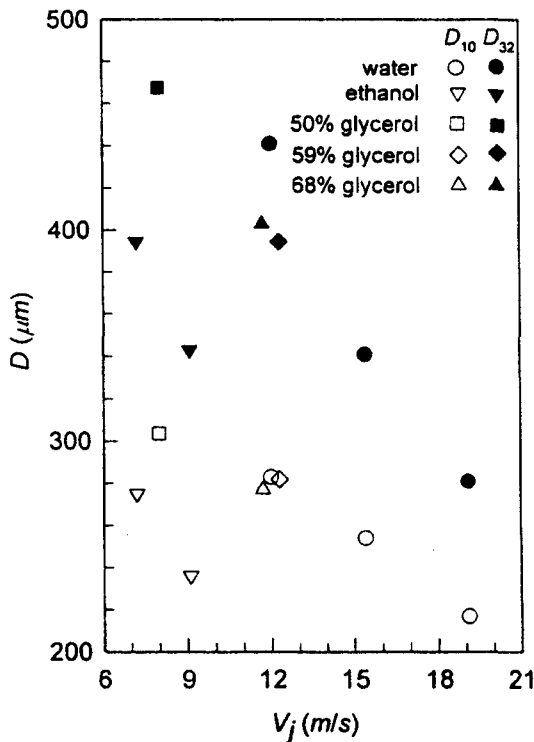


Fig. 5 Effect of Liquid Properties on Droplet Diameters for $D_j = 1.016$ mm, $2\theta = 90^\circ$

세롤 수용액의 평균직경은 점도의 큰 변화로 인하여 전체 분무패턴에는 큰 차이가 존재하는 데도 불구하고, 충돌전 액주 속도의 증가로 인하여, 단순 감소하는 것을 알 수 있다. 반면에 에탄올 액적의 평균 직경은 글리세롤 수용액의 그것보다 작음을 보여 주고 있다. 따라서, 액체의 점도는 생성분무의 전체적 패턴에 영향을 미치고, 액체의 표면장력은 생성액적의 평균직경에 더 영향을 미친다고 볼 수 있겠다.

Fig. 6 (a), (b)는 각각, 분무의 중심과 가장자리, 상류와 하류에서 측정된 액적직경, 즉 액적 직경의 공간분포에 따른 변화를 보여 주고 있다. Fig. 6 (a)는 분무 중심에서의 액적 직경이 분무 가장자리에 위치한 액적보다 큼을 보여 주고 있는데, 이는 Foster와 Heidmann[3], Anderson et al.[6]의 결과와도 일치하고 있다. 이러한 결과는, 액막의 분열에 의해 생성되는 액적의 직경이 일반적으로 액적이 액막으로부터 분열되는 위치에서의 액막의 두께와 거의 비례하게 되기 때문이다. 충돌 제트에 의하여 형성되는 충돌점 주변의 액막은 분무의 중심측

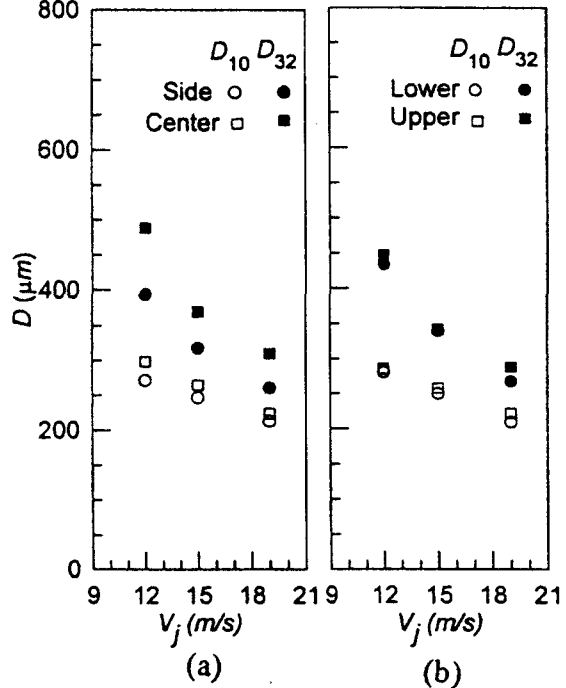


Fig. 6 Spatial Characteristics of Droplet Diameters for Water, $V_j = 12.0$ m/s, $D_j = 1.016$ mm, $2\theta = 90^\circ$

에서 가장 두껍고, 중심축에서 가장자리로 갈수록 두께가 얇아지게 된다. 따라서, 분무 중심축 주변에서는 액파의 직경도 크고, 큰 액파로부터 큰 액적이 형성되지만, 가장자리로 갈수록 액파의 직경도 감소하고, 작은 액적이 형성되게 된다. 반면에, Fig. 6 (b)에서 알 수 있듯이, 분무의 상류와 하류에서 측정된 액적 직경에는 큰 차이가 발견되지 않고 있다. 이는, 액막과 액파로부터 분열된 상류의 액적이 하류로 진행하면서, 더 이상의 2차 분열이 발생하지 않음을 보여 주는 결과이다.

액적의 크기분포에 대한 표현식들은 여러 가지가 제안되고 있는 데, 본 연구에서는 Rosin-Rammler 분포함수[12]와, Simmons[13]가 제안한 universal root-normal 분포함수를 실험적인 결과와 비교하였다. Simmons는 액적

직경을 D_{MMD} (질량중심입경)으로 무차원화시키면, 노즐의 종류, 사용유체의 물리적 성질 등에 관계 없이 적용할 수 있는 분포함수를 제안하였다. Fig. 7은 $D_n = 1.016 \text{ mm}$, $2\theta = 90^\circ$ 이고 액주 속도가 (a), (b), (c) 각각 12.0, 15.4, 19.1 m/s일 경우, 액적 직경의 분포함수를 비교한 것이다. 전반적으로, universal root-normal 분포함수가 Rosin-Rammler 분포함수보다, 실험값에 더 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 액주 속도가 증가함으로 인하여, 분포함수 기울기가 더욱 급경사로 되는 데, 이는 직경이 작은 액적이 더 많이 생성되었음을 의미한다.

3.3 액적속도

Fig. 8은 액체의 물리적 성질이 액적 속도에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 액체의 점도, 표면장력 등이 많이 변화하였는데도 불구하고,

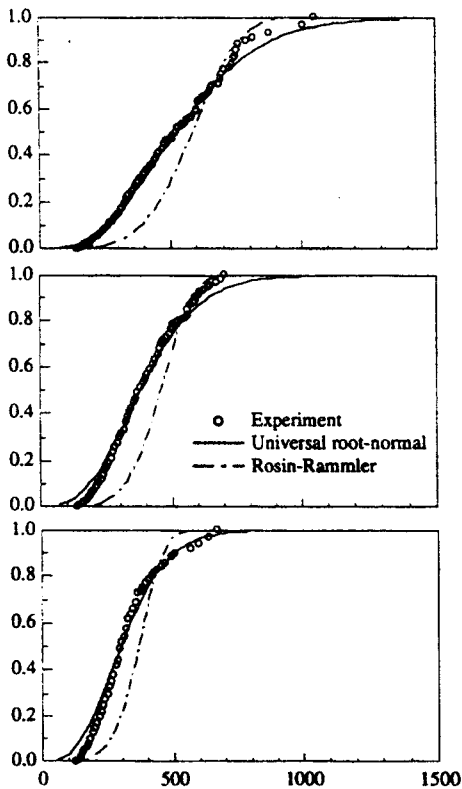


Fig. 7 Comparison of Cumulative Volume Distribution for Water, $D_n = 1.016 \text{ mm}$, $2\theta = 90^\circ$ (a) $V_j = 12.0 \text{ m/s}$ (b) $V_j = 15.4 \text{ m/s}$ (c) $V_j = 19.1 \text{ m/s}$

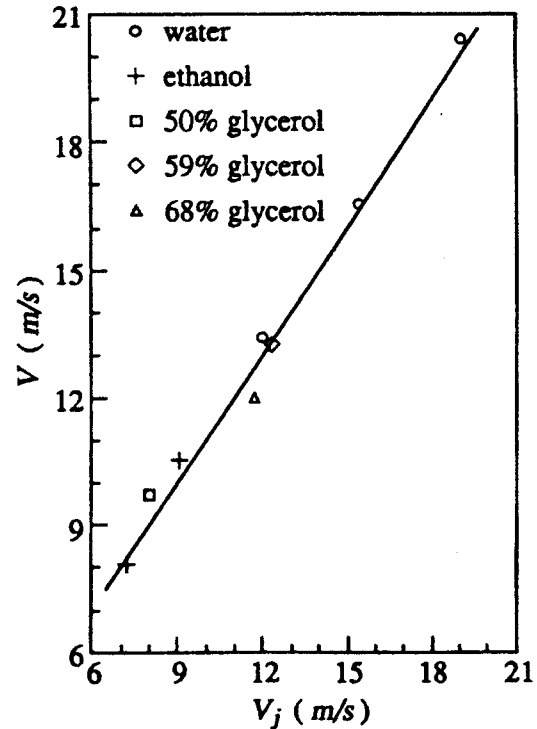


Fig. 8 Effect of Liquid Properties on Droplet Velocities for $D_n = 1.016 \text{ mm}$, $2\theta = 90^\circ$

액적 속도는 충돌 전 액주 속도에 선형으로 비례한다는 것을 보여 주고 있다. 따라서, 액체의 물리적 성질은 생성되는 액적의 크기에는 많은 영향을 미치지 않지만, 속도에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

충돌 제트에 의해 형성되는 분무는, 분무 패턴의 홀로그래프로부터 파동적인 특성을 보였으며, 이는 특히 점도가 높은 글리세롤 수용액에서 두드러지게 나타났다. 액체의 물성치가 분무 특성에 미치는 영향은, 유체의 점도는 전체 분무 패턴에, 표면장력은 액적 크기에 영향을 미쳤지만, 액적 속도는 점도 및 표면장력의 영향을 받지 않았다.

분무 하류에 존재하는 액적의 형성은 큰 액적의 분열로 인한 2차 미립화보다는, 충돌점 주변에서 형성된 액막으로부터 액주의 분열, 분열된 액주의 액적으로서의 분열이 주된 생성 요인이라고 할 수 있다. 따라서, 분무의 상류 지역과 하류 지역에서의 액적 직경의 차이는 크지 않았지만, 분무 중심축과 가장자리에서는 액막 두께와의 밀접한 관련성으로 인하여, 분무 중심축에서 큰 액적이, 가장자리로 갈수록 작은 액적이 형성되었다.

참고 문헌

1. G. P. Sutton, Rocket Propulsion Element : An Introduction to the Engineering of Rockets, John Wiley & Sons, 1992, pp. 298-311.
2. Heidmann, M.F., Priem, R.J., and Humphrey, J.C., 1957. A Study of Sprays Formed by Two Imping Jets, NACA TN 3835.
3. Foster, H.H., and Heidmann, M.F., 1960. A Spatial Characteristics of Water Spray Formed by Two Impinging Jet at Several Jet Velocities in Quiescent Air, NASA TN D-301.
4. Heidmann, M.F., and Foster, H.H., 1961. Effect of Impingement Angle on Drop Size Distribution and Spray Pattern of Two Impinging Water Jets, NASA TN D-872.
5. Dombrowski, N., and Hooper, P.C., 1963. A Study of Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 18, pp. 392-400.
6. W. E. Anderson, H. M. Ryan, S. Pal, and R. J. Santoro, "Fundamental Studies of Impinging Liquid Jets", AIAA Paper No. 92-0458, 1992.
7. P. Vassallo and Ashgriz, "Effect of Flow Rate on the Spray Characteristics of Impinging Water Jets", Journal of Propulsion and Power, Vol. 8, pp. 980-986, 1992.
8. 박성영, 김선진, 박승운, 김유, "액체 로켓용 충돌형 Triplet 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제20권, 제3호, pp. 1005-1014, 1996.
9. 이충훈, 정영호, 정석호, "충돌제트의 유량분포 및 혼합특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제21권, 제1호, pp. 99-112, 1997.
10. B. Kang, A Holographic Study of the Dense Region of a Spray Created by Two Impinging Jets, Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Chicago, 1995.
11. 강보선, D. Poulidakos, "이미지 분리를 이용한 입자 속도 측정을 위한 홀로그래피 시스템의 개발", 한국액체미립화학회지, 제2권, 제2호, pp. 16-23, 1997.
12. A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Co., 1989, p. 87.
13. Simmons, H. C., 1977, The Correlation of Drop-Size Distributions in Fuel Nozzle Sprays, Journal of Engineering for Power, Vol. 99, No. 3, pp. 309-319.