

충돌 제트로 형성되는 분무의 속도 특성에 대한 연구

추연준* · 서귀현** · 강보선***

A Study on the Velocity Characteristics of the Spray Formed by Two Impinging Jets

Yeon-Jun Choo, Kwi-Hyun Seo, and Bo-Seon Kang

Key Words: Impinging Jets(충돌제트), Liquid Sheet(액막), Droplets(액적), Liquid Ligament(액띠)

Abstract

In this study, the velocity characteristics of liquid elements formed by two impinging jets is analysed using double pulse image capturing technique. For the droplets formed by low speed impinging jets, the droplet velocities are higher with smaller azimuthal and impingement angle. The maximum droplet velocities are about 25 % lower than jet velocity. With an increase of azimuthal angle, the shedding angles increases but remains lower than azimuthal angle. The velocities of ligaments formed by high speed impinging jets gradually decreases with an increase of azimuthal angle. The maximum ligament velocities are about 40 % lower than jet velocity. Higher impingement angles produce lower ligament velocities. The shedding angles of ligament almost increases with the same value of azimuthal angle, which implies that the moving direction of ligaments is radial from the origin as the impingement point.

1. 서론

액체 연료를 사용하는 로켓 엔진의 인젝터로는 제작의 단순성 및 우수한 혼합 특성으로 인하여 유동충돌형의 일종인 충돌 제트 인젝터(impinging-jet injector)가 많이 이용되고 있다. 서로 충돌하는 두 제트는, 각 제트의 속도가 낮을 경우는 Fig. 1에 나타낸 것처럼, 액막(liquid sheet)이 형성되고, 제트의 속도가 증가하면 선형 분무(fan spray)가 형성된다. 즉, 충돌점 주변에는 조그만 부채꼴 모양의 액막이 형성되고, 그 하부로는 호 모양의 액띠(liquid ligaments)가 형성되며, 이 불안정한 액띠는 하부로 진행하면서 수 많은 액적들을 부서지게 된다.

저속 제트에 의해 형성되는 액막의 특성과 관

련된 연구에는 액막의 두께^{(2)~(5)}, 형상^{(2),(6)}, 속도⁽⁷⁾ 액막 주변 액적 크기나 속도^{(6),(8),(9)}에 대한 실험적, 이론적 해석이 수행되었다. 고속 제트에 의해 형성되는 분무 특성에 대한 연구는 전체적인 분무 패턴⁽¹⁰⁾, 액막의 분열 메카니즘⁽¹¹⁾, 액막 분열길이^{(12)~(14)}, 분무 액적의 크기 및 속도^{(9)~(14)}와 관련된 연구가 수행되었다.

충돌 제트에 의해 형성되는 선형 분무의 특성을 예측하기 위해서는, 충돌점 주변의 액막과 액막의 두께가 얇아지며 떨어져 나오는 액띠들의 특성에 대한 연구가 필요하다. 특히, 액띠가 분열되어 생성되는 액적들의 이동 방향 및 운동량에 직접적인 관련성이 있을 뿐만 아니라, 분열 액적 모델링에 있어서도 매우 중요한 인자로 작용하는 액막, 액띠의 속도에 대해서는, 신뢰성이 높은 실험적 연구 결과가 무엇보다도 기대되고 있지만, 실험적으로 이를 측정할 연구는 지금까지 수행된 바가 없다.

단지, 기존의 연구들^{(2),(11),(13),(14)}은 액막 속도를, 충돌 전 제트의 평균 속도, V_j 또는 충돌하는 제트 속도의 축방향 성분 $V_j \cos \theta$ 로 가정하고, 이

* 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 전남대학교 자동차공학부

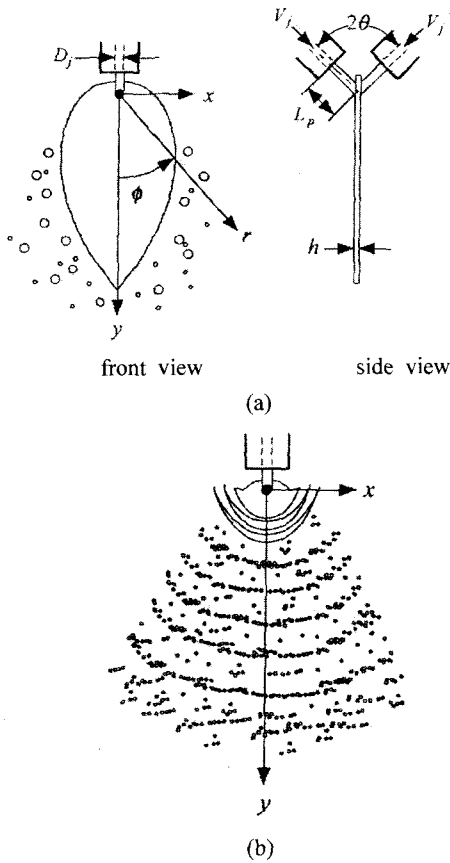


Fig. 1 Schematic diagram of (a) a liquid sheet and (b) a spray formed by two impinging jets.

러한 액막 속도에 대한 가정을 바탕으로 액막의 분열 모델과 분열 액적의 크기 등을 예측하였다.

본 연구에서는 저속 충돌 제트에 의해 형성되는 액막으로부터 분열되어 나간 액적들의 속도 및 비산 각도를 측정하였고, 고속 충돌 제트에 의해 형성되는 분무에 대해서는 액막 하부의 불규칙적인 액파들의 두 순간에서의 이미지를 획득하여, 속도를 측정하였다. 이를 통하여, 충돌 후 형성되는 액체 요소들의 속도를 충돌 전 제트 속도와 비교, 분석하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구의 실험 장치는 Fig. 2에 나타난 것처럼, 액막 및 분무를 형성하는 충돌 제트 시스

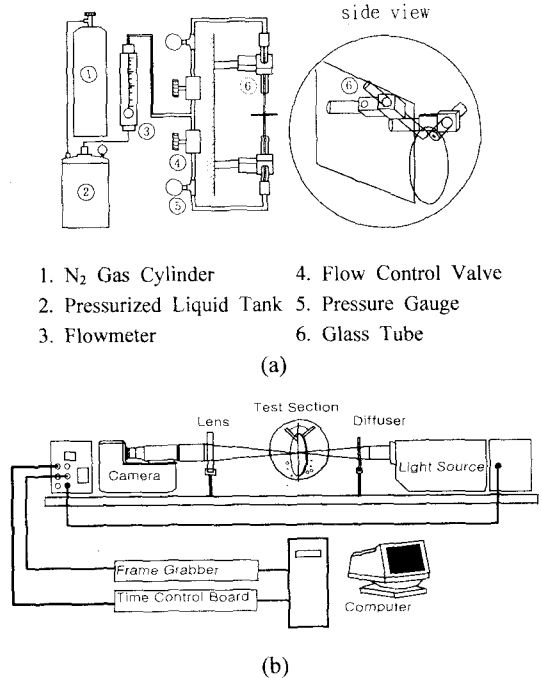


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus; (a) impinging jet system (b) PMAS system

템, 분무 가시화 시스템, 오리피스 이송 장치, 이미지 처리 시스템으로 구성되어 있다. 사용 유체는 물이며, 보다 안정되게 액체를 공급하기 위해 고압 질소를 이용하여 액체 저장용기를 일정한 압력으로 유지하였으며, 가압된 용기로부터 액체가 유량계로 공급된다. 이 유량계에서 액체의 유량을 미세하게 조절함으로써, 제트의 분사 속도를 제어할 수 있다. 유량계에서 나온 액체는 양 제트의 공급 라인으로 분할되고, 각 제트의 속도를 동일하게 유지시키기 위하여, 유량을 미세하게 제어할 수 있는 미세 유량조절밸브와 압력계를 거쳐 오리피스로 공급된다. 오리피스는 정밀하게 가공된 유리관을 사용하여 관벽의 표면 거칠기의 영향을 최소화하였다. 또한, 안정된 액막과 충분히 발달된 제트를 형성하기 위해 오리피스 길이를 직경에 비해 상대적으로 긴 15.24 cm로 하였으며, 사용된 오리피스의 내경은 0.85 mm이다.

광학 시스템은 PMAS(Particle Motion Analysis System, V-tek)를 사용하였다. 50 ns의 아주 짧은

시간 동안 발광하는 이중 스파크 광원을 사용함으로써, 고속으로 이동하는 물체의 두 순간의 정지된 화상을 얻는데 용이하여, 입자의 크기 및 속도 측정에 사용되는 장비이다. 이미지 배경을 균일하게 하기 위하여, 광원과 측정 영역 사이에 산란판(diffuser)을 두었다. 또한, 측정 영역의 확대된 영상을 획득하기 위해, 망원렌즈와 필드 렌즈를 조합한 렌즈 시스템을 구성, CCD 카메라와 연결하여 고 배율의 왜곡이 없는 이미지를 얻을 수 있도록 하였다. 이렇게 얻어진 영상은 프레임 그래버를 이용하여 최종적으로 디지털화된 이미지로 변환되어 컴퓨터에 저장된다. 각 액체 요소의 이동 거리 측정은 이미지 분석 프로그램 (Inspector, Matrox)을 이용하여 분석하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

Figure 3은 저속과 고속 충돌 제트에 의해 형성되는 액막과 분무의 전형적인 패턴을 보여주고 있다. 저속 충돌 제트에 의해 형성되는 액막에 대해서는 액막 주변에 존재하는 액막으로부터 분열된 액적들의 속도와 비산각(shedding angle)을 측정하였다. 비산각은 속도 벡터의 방향을 의미한다. 이를 위하여 Fig. 4 (a)에 나타낸 것과 같이, 액막 주변의 미세 면적을 확대하여, 동일 액적의 두 순간에서의 이미지로부터 이동 거리를 측정, 시간 간격으로 나누어 액적 속도와 비산각을 계산하였다. 첫 번째와 두 번째 펄스의 빛의 강도 차이를 두어, 각 펄스의 이미지를 쉽게 구별하도록 하였다. 실험 조건은 일정한 제트 속도 ($V_j=5.39$ m/s)에서 충돌각 2θ 가 80° , 100° , 120° 인 경우에 대해, 방위각(ϕ)에 따른 속도와 비산각 분포를 파악하였다. 측정 영역은 액막의 중심축, 즉 방위각 $\phi=0^\circ$ 를 중심으로 좌우 대

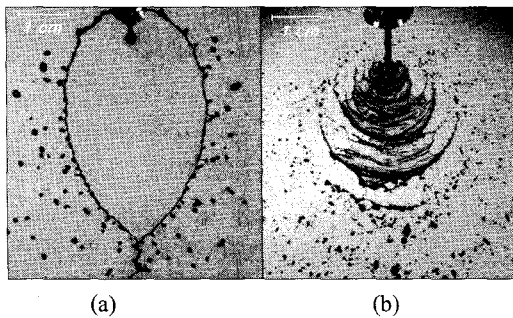


Fig. 3 Photographs of a typical (a) liquid sheet and (b) spray formed by two impinging jets.

칭이므로, 액막의 한 쪽 영역의 액적이 존재하는 방위각 $0^\circ \sim 90^\circ$ 범위인 $7\text{ cm} \times 3.5\text{ cm}$ 면적을 대상으로 측정하였다.

고속 충돌 제트에 의해 형성되는 충돌점 주변 액막으로부터 분열된 매우 불규칙적인 액적들의 속도를 측정하기 위해서, 펄스 간격 동안 이미지 형상의 변화가 크게 일어나지 않도록, 최대한 짧은 펄스 간격을 사용하였으며, Fig. 4 (b)에 나타낸 것과 같이 상당히 확대된 이미지를 사용하였다. 속도 추출 과정은 우선 두 펄스의 이미지를 분리, 첫 번째 펄스의 이미지에서 라플라시안 도구(Laplacian operator)를 사용하여 에지(edge)를 추출한 후, Fig. 4 (b)처럼 이미지를 각각 20×16 의 요소로 나눈다. 각 요소들을 두 번째 펄스의 이미지와 매칭(matching)시켜 이 요소의 변위를 측정, 이로부터 속도와 비산각을 구했다. 실험은 충돌각 2θ 를 80° , 100° , 120° 로, 제트 속도는 10.91, 15.31, 19.91 m/s로 변화시키며, 액적이 존재하는 $5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 영역에 대해서, 방위각에 따른 속도와 비산각 분포 특성을 파악하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 저속 충돌 제트에 의한 액적 속도 결과

저속 충돌 제트의 경우 액막 주변에서 떨어져 나가는 액적의 속도와 비산각에 대한 결과를 액적 속도가 크게 나타나는 충돌각 $2\theta=80^\circ$ 에 대해서 Fig. 5에 나타내었다. 중심축 주변에서 나타나는 액적의 최대 속도는 제트 속도보다 25% 정도 낮게 나타나며, 중심축에서 방위각이 증가할

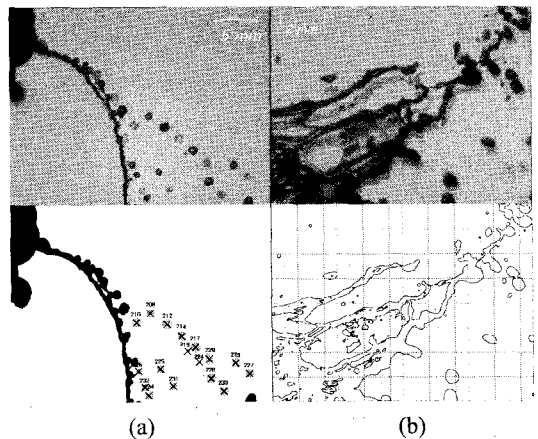
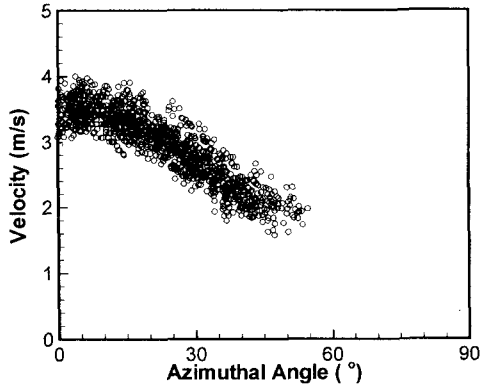
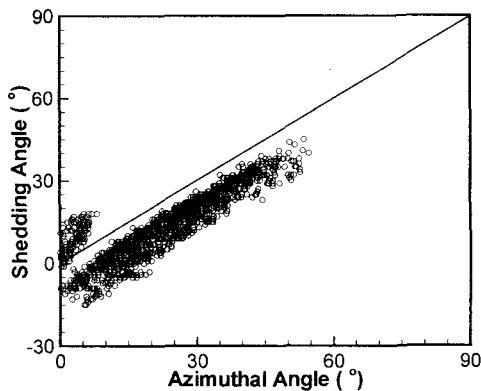


Fig. 4 Magnified photographs used for velocity measurements (a) droplets (b) ligaments.



(a)



(b)

Fig. 5 Measurement results of disintegrating droplets for $2\theta=80^\circ$, $V_j=5.39$ m/s; (a) velocities (b) shedding angles.

수속 감소하고 있다. 비산각은 방위각이 증가함에 따라 증가하지만 항상 방위각보다는 낮은 값을 보이고 있다. 이는 액적이 액막 가장자리(rim)의 접선 방향으로 떨어져 나가기 때문이다. 액막의 가장자리로 갈수록 액막의 접선 각도는 0에 접근하게 되고, 접선 각도가 0이 되기 시작하는 방위각 이하에서는 액적의 비산각이 음의 값으로 나타나고 있다. 비산각이 음의 값을 갖기 시작하는 방위각은 제트 사이의 충돌각이 커지면 증가하는 데, 이는 충돌각이 증가하면 액막의 폭이 커지면서, 액막 접선각이 0이 되는 방위각도 증가하기 때문이다. 중심축 주변 낮은 방위각에서도 양의 비산각을 보이는 액적들은 액막 끝 위치에서 액막의 가장자리 부분이 병합되는 현상에 의한 것으로 판단된다.

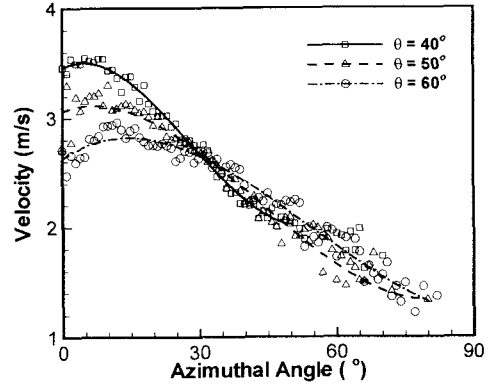


Fig. 6 Effect of impingement angle on droplet velocities.

Figure 6은 제트 사이의 충돌각이 액적 속도에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 각 방위각에서의 액적 속도는 Fig. 5 (a)와 같은 속도 폭을 가진 데이터를 방위각에 따라 평균하여 나타낸 것이다. 액적 속도는 주와 강⁽⁷⁾이 측정한 액막의 속도 분포와 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 방위각의 증가에 따라, 액적 속도는 약간 증가하여 최대값에 이른 후 감소하며, 충돌각이 클수록, 중심축 주변의 액적 속도가 낮아 완만한 하강 경향을 나타내고 있다. 이는 충돌각의 증가로 인하여 충돌 전 제트의 수평 운동량이 충돌에 의하여 감소하여, 액적 속도의 감소로 나타났다고 볼 수 있다.

3.2 고속 충돌 제트에 의한 액주 속도 결과

Heidmann 등⁽¹⁰⁾은 충돌 제트의 속도가 저속에서 고속으로 증가함에 따라 형성되는 액막과 분무를 크게 네 영역으로 구분하였으며, 가장 고속인 경우에는 완전 발달된 분무(fully developed spray)가 형성된다고 하였다. Figure 7은 고속 충돌 제트에 의해 충돌점 주변의 액막으로부터 매우 불규칙적인 액띠들이 형성되고, 이 액띠들이 하류에서 불규칙적으로 분열되어 분무 액적을 형성하는 과정을 보여 주고 있다. 기존 연구에 의해서도 밝혀졌듯이, 액띠의 간격이 충돌점에서 멀어질수록 조금씩 증가하고 있는 데, 이는 제트의 고속 충돌로 인하여 안정된 상태에 있던 액막 표면에 파동이 형성되면서, 충돌점에서 멀어질수록 파장이 조금씩 증가하고, 파동의 골 부분에서

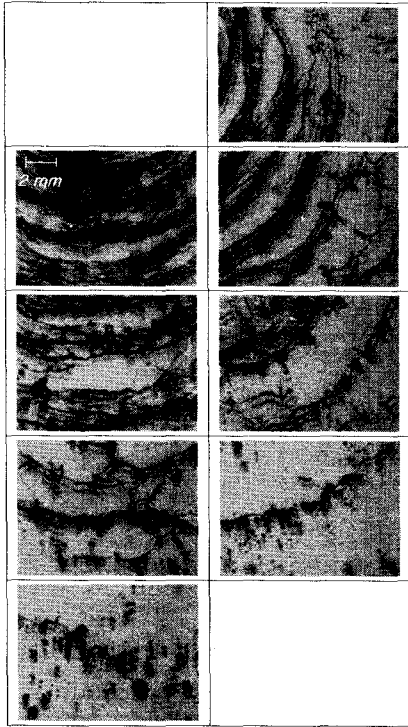


Fig. 7 Disintegration mechanism of a liquid sheet showing very irregular shape of ligaments.

액막이 분열되어 액뿔을 형성하기 때문이다. 이러한 파동에 의한 액막 분열 메카니즘은 생성되는 액뿔, 액적의 주기성으로 나타나며, 이것이 연소 불안정성의 주기와 거의 일치한다는 연구 결과도 보고되고 있다.

Figure 8은 Fig. 7과 같은 이중 펄스 액뿔 이미지로부터, 전술한 방법에 의하여 측정된 액뿔의 속도를 방위각에 따라 나타낸 것이다. 중심축 주변의 최대 액뿔 속도는 충돌 전 제트 속도인 19.61 m/s보다 약 40 % 정도 감소한 속도를 나타내며, 방위각이 증가할수록 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. Figure 8의 데이터를 방위각에 따라 평균하여 충돌 제트 속도의 변화에 따른 액뿔 속도를 Fig. 9에 나타내었다. Figure 8에서도 나타났듯이, 모든 제트 속도에서 중심축 주변의 최대 액뿔 속도는 제트 속도의 약 40 % 정도 낮았으며, 방위각 30° 정도까지는 큰 변화가 없다가 방위각이 증가할수록 감소하였다. 일정한 제트 속도에서, 충돌각을 변화시켰을 때, 액뿔 속도를 Fig. 10에 나타내었다. 충돌각이 커질수록, 충돌에

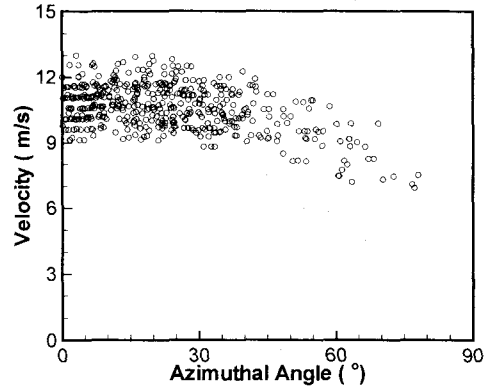


Fig. 8 Velocities of ligaments for $2\theta=80^\circ$, $V_j=19.61$ m/s.

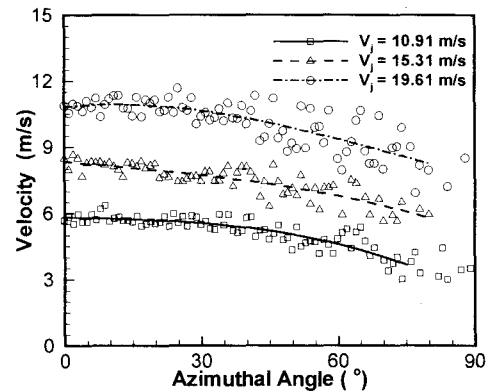


Fig. 9 Effect of jet velocities on ligament velocities for $2\theta=80^\circ$.

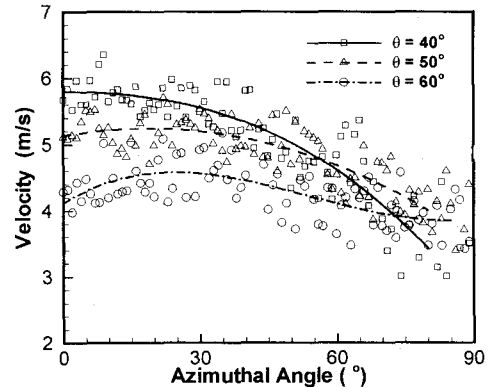


Fig. 10 Effect of impingement angle on ligament velocities for $V_j=10.91$ m/s.

의한 제트의 운동량 손실이 커지기 때문에 액뿔 속도가 낮아지고 방위각에 따른 변화도 크지 않

4. 결 론

본 연구에서는 충돌 제트에 의해 형성되는 액체 요소들의 속도를 이중 필스 이미지 방법에 의하여 측정하여 제트 속도와 비교, 분석하였다. 저속 충돌 제트에 의해 형성되는 액막 주변에 분열되는 액적들은 방위각이 증가하면서 감소하였으며, 중심축 주변의 최대 속도는 제트 속도보다 약 25 % 정도 감소되었음을 나타내었다. 비산각은 방위각의 증가에 따라 증가하였지만 항상 방위각보다는 낮은 값을 보였다. 고속 충돌 제트에 의하여 형성되는 충돌점 주변 액막 하부의 액피들의 속도도 방위각의 증가에 따라 감소하고, 충돌각이 클수록 낮은 값을 나타내었으며, 최대 속도는 제트 속도보다 약 40 % 정도 감소되었음을 나타내었다.

참 고 문 헌

- (1) Sutton, G. P., 1992, *Rocket Propulsion Element: An Introduction to the Engineering of Rockets*, John Wiley & Sons, pp. 298-311.
- (2) Taylor, F. R. S., 1960, "Formation of Thin Flat Sheets Of Water," *Proc. Roy. Soc. of London*, Vol. 259, pp. 1-17.
- (3) Hasson, D. and Peck, R. E., 1964, "Thickness Distribution in a Sheet Formed by Impinging Jets," *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 10, pp. 752-754.
- (4) Ibrahim, E. A. and Przekwas, A. J., 1991, "Impinging Jets atomization," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, No. 12, pp. 2981-2987.
- (5) Shen, Y., *Impinging Jet Atomization at Elevated and Supercritical Ambient Conditions*, 1997, Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Chicago.
- (6) Kang, B. S., Shen, Y. B., Poulidakos, D., 1995, "Holography Experiments in the Breakup Region of a Liquid Sheet Formed by Two Impinging Jets," *Atomization and Sprays*, Vol. 5, No. 4&5, pp. 387-402.
- (7) 추연준, 강보선, 2000, "저속 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 속도 분포에 관한 연구," 한국액체미립화학회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 41-48.

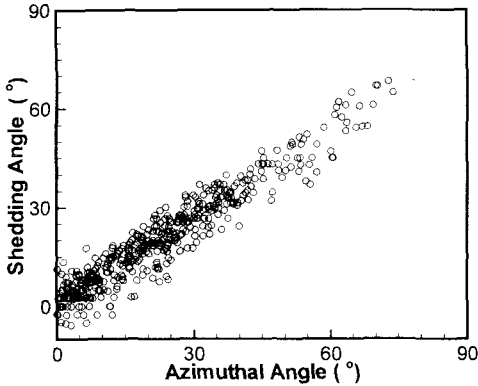


Fig. 11 Shedding angles of ligaments for $2\theta=80^\circ$, $V_j=19.91$ m/s.

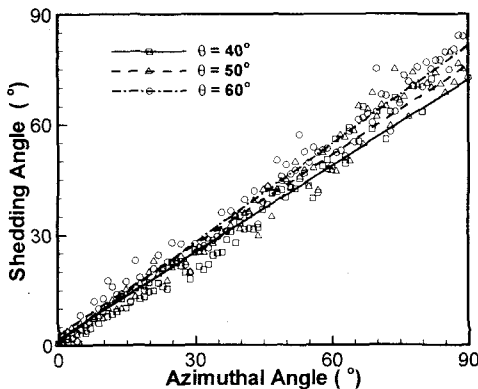


Fig. 12 Effect of impingement angle on shedding angles for $V_j=10.91$ m/s.

다. 반면에, 낮은 충돌각에서는 중심축에서 가장 높은 값을 갖고 방위각이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

액피의 진행 방향을 파악하기 위하여, 액피 속도 벡터의 방향을 비산각으로 정의하여, Fig. 11에 나타냈다. 저속의 액적 경우에는 비산각이 방위각보다 낮았는데, 고속 액피의 경우에는 비산각이 방위각과 거의 비슷함을 알 수 있고, 이는 액피의 진행 방향이 충돌점을 중심으로 거의 반경 방향으로 진행하고 있음을 의미한다. Figure 11의 데이터를 방위각 방향으로 평균하여, 충돌각의 변화가 비산각에 미치는 영향을 Fig. 12에 나타내었다. 충돌각이 증가하면, 예상했던 결과대로 액피의 비산각 역시 증가함을 나타내고 있다.

- (8) Couto, H. S. and Bastos-Netto, D., 1991, "Modeling Droplet Size Distribution from Impinging Jets," *J. of Propulsion and Power*, Vol. 7, No. 4, pp. 654-656.
- (9) Lai, W. H., Huang, J. C. P., Jiang, T. L., 1999, "Characteristic Study on the Like-Doublet Impinging Jets Atomization," *Atomization and Sprays*, Vol. 9, pp, 277~289.
- (10) Heidmann, M.F., Priem,R.J., and Humphrey, J.C., 1957, A Study of Sprays Formed by Two Imping Jets, NACA TN 3835.
- (11) Dombrowski, N., Hooper, P. C., 1964, "A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 18, Part 3, pp. 392~400.
- (12) 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.
- (13) Anderson, W. E., Ryan, H. M., Pal, S., Santoro, R. J., 1992, "Fundamental Studies of Impinging Liquid Jets," AIAA Paper No. 92-0458.
- (14) Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S. and Santoro, R. J., 1994, "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets," *J. of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 1, pp. 135~145.