

저속 충돌제트에 의해 형성되는 액막의 속도 분포에 관한 연구

추연준* · 강보선**

A study on the Velocity Distribution of the Liquid Sheet Formed by Two Impinging Jets at Low Velocities

Yeon Jun Choo and Bo Seon Kang

Key Words: Impinging-Jet Injector(충돌제트 인젝터), Liquid Sheet(액막), Liquid Sheet Velocity(액막 속도), LDV(Laser Doppler Velocimeter)

Abstract

In this research, the velocity distribution of the liquid sheet formed by two impinging jets at low velocities are measured using LDV. The spatial distribution of the sheet velocity as well as the effects of impinging angle and jet velocity are examined. The sheet velocity is the highest along the sheet axis and it decreases with the increase of the azimuthal angle. With the increase of the impinging angle, however, the difference of sheet velocity on the liquid sheet is decreased. The average sheet velocity is proportional to the jet velocity but it is always higher than the jet velocity as against the fact that the sheet velocity can be assumed to be equal to the jet velocity in the previous researches.

1. 서 론

액체 연료를 사용하는 로켓 엔진의 인젝터로는 제작의 단순성 및 우수한 혼합 특성으로 인하여 유동충돌형의 일종인 충돌제트 인젝터(Impinging-jet injector)가 많이 이용되고 있다. 서로 충돌하는 두 제트는, 각 제트의 속도가 낮을 경우는 Fig. 1에 나타낸 것처럼, 두 제트를 포함하는 평면에 직각인 평면에, 나뭇잎 모양의 액막(Liquid sheet)이 형성된다. 각 제트의 속도가 액체의 미립화를 위해 충분할 정도로 증가되면, 선형 분무(Fan spray)가 형성된다. 이러한 형식의 인젝터에 의해 형성되는 분무의 특성을 좌우하는 주요 인자들은, 충돌 전 제트의 특성(충류 또는 난류), 각 제트의 속도 V_j , 오리피스 직경 D_j , 분사 각도

(두 제트 사이의 각도) 2θ , 오리피스 출구에서 충돌점까지의 거리 L_p , 분무 환경 및 분무 액체의 물리적 성질 등 매우 다양하며, 그로 인하여 실제 형성되는 분무의 미립화 메카니즘은 매우 해석하기가 어려운 복잡한 특성을 보여주고 있다.

충돌제트에 의해 형성되는 분무의 특성을 파악하기 위해서는, 충돌점 주변에 형성되는 액막의 특성에 대한 연구가 절대적으로 필요하다. 왜냐하면, 액막이 하부로 갈수록 두께가 얇아지면서 액적을 형성하게 되고, 이 액적이 부서져 수 많은 액적을 형성하기 때문이다. 따라서, 충돌점 주변 액막의 특성, 즉, 액막의 분열 메카니즘, 액막 분열 길이, 액막 두께, 액막 속도 등과 관련된 연구들이 수행되어야 할 것이다. 특히, 생성되는 액적의 이동 방향 및 운동량에 직접적인 관련성이 있을 뿐만 아니라 생성 액적 모델링에서도 중요한 인자로 영향을 미치게 되는 액막 속도에 대해서는, 신뢰성이 높은 실험적 연구 결과가 무엇보다도 기대되고 있지만, 직접적으로 액막 속도를

* 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 전남대학교 자동차공학부

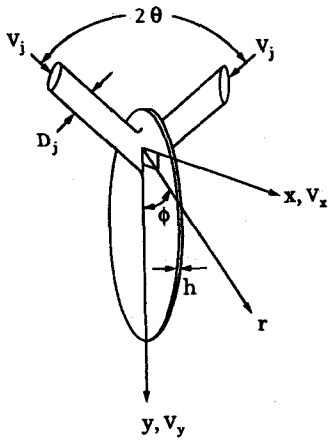


Fig. 1 A liquid sheet formed by two impinging jets

측정한 연구는 지금까지 수행되지 않고 있다.

단지, 기존의 연구들은 액막 속도를, 충돌하는 제트 속도의 축방향 성분 $V_j \cos \theta$, 또는 충돌 전 제트의 평균속도, V_j 로 간주하였다. 예를 들면, Taylor⁽¹⁾는 두 제트의 충돌 후, 충돌점 부근에서는 제트의 에너지 손실이 없다는 가정 하에서 액막 속도 또한 제트 속도와 같다고 가정하였다. Dombrowski와 Hooper⁽²⁾는 층류와 난류 제트에 대하여, 고속촬영법을 사용하여 액막 속도를 측정하였다. 층류 제트의 경우, 작은 충돌각에서는 제트의 중심에서 빠른 속도를 가지는 유선으로 인해서 높은 속도 영역이 액막에 형성되어, 액막 중심부 속도가 제트 속도보다 약간 빠르게 나타났다. 하지만, 충돌각이 커지면 충격력의 증가로 인해 액막 표면에 교란이 형성되어, 액막 전체적으로 고른 속도 분포를 보이며, 액막 중심부 속도가 제트 속도보다 낮아진다고 하였다.

Anderson 등⁽³⁾과 Ryan 등⁽⁴⁾은 액적 속도를 PDPA를 이용, 비교적 낮은 충돌각($20 \sim 50^\circ$)에 대하여, 분무 중심축에서 측정하였다. 측정 결과, 액적 속도가 제트 속도와 거의 같음을 알 수 있었고, 속도가 빠른 경우 형성되는 액적 속도가 액막 속도와 유사할 것이라는 가정 하에서, 액막 속도를 제트 속도와 같다고 간주하였다.

따라서, 본 연구에서는 충돌제트에 의해 형성되는 액막 속도를 액막의 여러 위치에서 직접적으로 측정하여, 액막의 위치에 따른 공간적 속도 분포를 구하고, 충돌각, 제트 속도 변화가 액막

속도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

본 연구의 실험 장치는 Fig. 2에 나타난 것처럼, 액막을 형성하는 충돌 제트 시스템, 액막 속도를 측정하는 시스템으로 구성되어 있다.

보다 안정된 유체를 공급하기 위해 고압 질소를 이용하여 저장용기를 일정 압력으로 유지하였으며, 가압된 용기로부터 액체가 제트의 분사 속도를 제어할 수 있는 유량계로 공급된다. 유량계에서 나온 유체는 양 방향으로 나뉘어, 공급 유량을 미세하게 제어할 수 있는 미세 유량조절밸브, 압력계를 거쳐 오리피스로 공급된다. 오리피스는 정밀하게 가공된 유리 튜브를 사용하여 관벽의 표면 거칠기의 영향을 최소화하였다. 또한, 안정된 액막을 얻고, 충분히 발달된 제트를 형성하기 위해 오리피스 길이를 직경에 비해 상대적

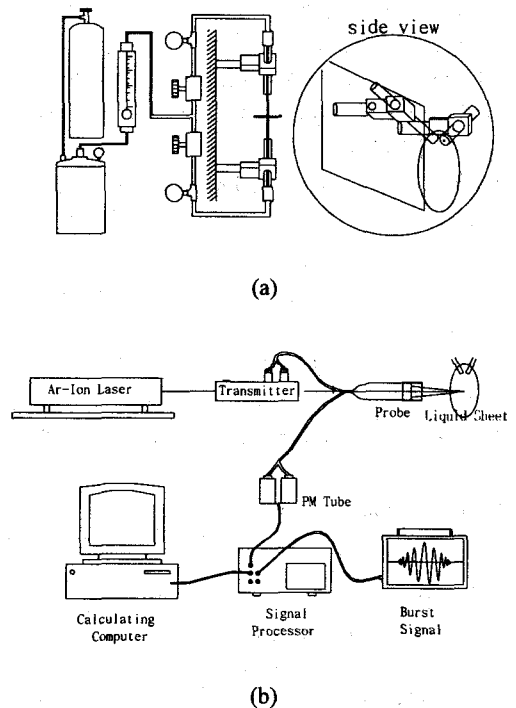


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus; (a) impinging jet system, (b) LDV system

으로 긴 15.24 cm로 하였으며, 사용된 관의 내경은 1.0 mm이다.

액막 속도 측정은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 빛의 도플러 효과를 이용하는 LDV(Laser Doppler Velocimeter, Dantec) 시스템을 사용하였다. 광원인 Ar-Ion 레이저에서 나온 빔은 Bragg cell에서 514.5 nm의 녹색과 488 nm의 청색 파장의 빔으로 나뉘지고, 각 파장의 빔은 다시 두 빔으로 나뉜다. 그 중 한 빔을 40 MHz 천이시켜 속도 방향의 모호성을 해결한다. 두 파장대의 각 빔은 Probe를 통해서 액막에 초점을 맺고, 이 때 액막 내에 존재하는 미세한 미립자에 의해 후방 산란되는 빛을 수집한다. 얻어지는 신호는 매우 미약하기 때문에, 증폭기(Photomultiplier)를 통해서 증폭한 후, 신호처리기(Signal Processor)로 보내져 속도를 얻게 된다. Table 1은 본 연구에서 이용된 U, V성분의 광학적 특징을 나타낸 것이다.

2.2 실험조건

액막 속도 측정에 사용된 변수는, 두 제트 사이의 충돌각(2θ)과 제트 속도(V_j)이다. 충돌각은 100°, 120°, 140°에 대해서 측정하였고, 제트 속도는 2.0에서 3.0 m/s까지 변화시켰다. 이 경우, 제트의 레이놀즈 수, Re_j 는 2000~3000이며, 이것은 액막이 분열되지 않고 안정된 액막을 형성하는 범위라고 볼 수 있기 때문에, 이전 연구의 액막 분열이 존재하는 다소 높은 제트 속도 결과와는 차이가 있을 수 있다. 액막 전체의 속도 측정은 충돌점을 중심으로 방위각(ϕ)상으로 10°씩 증가시키며, 동일 방위각에서 반경 방향으로 10등분하여 측정하였다. 액막 분열에 관계되는 액막 속도는 액막 중심축을 따른 하향 방향의 속도이기 때문에, x 축을 중심으로 액막의 윗 부분에서는 속도를 측정하지 않았다. 따라서, 액막의 평

Table 1 Optical properties of U, V components

	U	V
Wave length(nm)	514.5	488
Fringe spacing(μm)	5.422	5.143
Number of fringes	36	36
Measurement volume(mm)	0.194	0.184
Gaussian beam dia.(mm)	1.35	1.35
Beam separation(mm)	38	38

균속도는 액막의 하향 방향 속도만을 측정하고, 단위 면적 당 속도로 환산하여 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

액막 속도를 측정하기 전에 충돌 전 제트의 속도 특성을 파악하기 위하여, 두 제트가 충돌하기 전 길이인 오리피스 끝에서 10 mm 떨어진 거리에서 제트 속도를 우선 측정하였다. Fig. 3에 나타난 제트 속도는 포물선 형태의 속도 분포를 가지고 있고, 제트 중심에서의 최고 속도가 평균 속도의 2 배 정도 되며, Schweitzer⁽⁵⁾가 언급했던 완전 발달된 층류 제트의 속도 분포를 보이고 있다.

또한, 측정된 속도와 면적을 이용하여 구해진 제트의 평균 속도는 2.77 m/s이며, 이 값은 일정 시간 수집된 유체의 유량과 단면적에 의해 계산된 제트의 평균 속도인 2.75 m/s와 거의 일치하고 있다. 이 결과는 측정 유량과 오리피스 직경으로부터 추정된 제트 속도가 실제 측정된 제트 속도와 일치함을 보여준 Foster와 Heidmann⁽⁶⁾의 연구 결과와도 일치하고 있다. 따라서, 충돌 이전 제트 단면에서 구해지는 이러한 포물선 형태의 속도 측정 결과로부터, 비교적 높은 속도의 제트 중심부와 낮은 속도의 그 주변부가, 충돌에 의하여 액막의 어느 부분으로 이동하는지에 따라서 액막의 속도 분포에 많은 영향을 준다고 볼 수 있다.

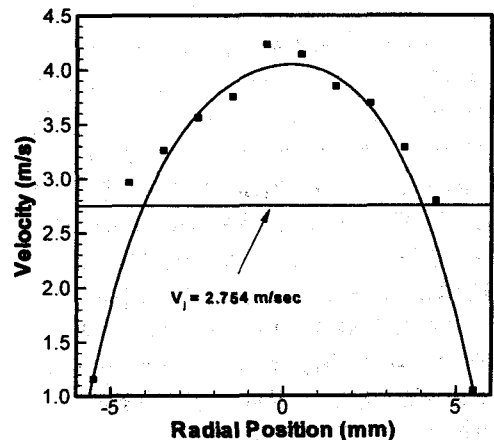


Fig. 3 Velocity distribution at the cross-section of the jet for $D_j=1.0$ mm, $V_j=2.75$ m/s.

Figure 4는 액막 전체에서의 속도 분포를 정성적으로 파악하기 위하여, 속도 벡터를 이용하여 나타낸 것이며, Fig. 5는 액막 속도의 반경 방향, 방위각 방향의 분포를 정량적으로 나타낸 것이다. Figure 4에서 보면, 충돌점을 중심으로 방사형 형태의 속도 분포, 즉 방사형 형태의 유선을 나타내고 있다. 이는 충돌 전 제트의 직선 형태 유선이 액막에서도 그대로 방사형 형태로 유지된다는 기존의 연구 결과⁽⁷⁾와도 일치하고 있다.

Figure 5에 나타낸 것과 같이 전체적인 액막 속도는 충돌점 주변에서 낮은 값을 갖고, 그 이후부터는 거의 일정하다가 액막 가장자리에서 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 충돌점 주변에서 낮은 속도가 나타나는 이유는, 충돌점에서의 액막 두께가 가장 두껍기 때문에⁽⁸⁾, 제트 속도가 낮은 영역과 중심의 높은 속도 영역이 공존하게 되고, 이 두 영역에 의해 액막 속도는 두께 방향으로도 차이를 보이게 된다. 이는 측정시에, 속도 피크가 두 군데에서 발생하는 것으로도 확인할 수 있다. 하지만, 충돌점을 반경 방향으로 5 mm 정도만 벗어나도, 속도 피크가 하나로 나타나는 것으로 보아, 액막 두께가 얇아지면서, 두께 방향으로의 액막 속도 변화가 점점 감소하였음을 알 수 있다. 또한, 액막 중심부 즉, 방위각이 낮을수록 액막 속도가 높은데, 이는 Dombrowski와 Hooper⁽²⁾가 층류 제트에 대해서는 충돌 전 제트 중심의 빠른 속도 영역이 액막의 중심부로 이동한다는 예측과 일치하고 있다.

액막의 평균 속도는, 액막 중심의 비교적 일정한 액막 속도를 반영하기 위해서, 이 값과 차이가 많이 발생하는 충돌점에서 아주 가까운 지점과 액막의 가장자리 부분을 제외한 측정값을 이용하여, 속도와 면적의 곱을 합한 후, 전체 면적으로 나눈 평균 속도를 계산하였다. 이렇게 산출된 평균 액막 속도는 3.43 m/s로 충돌 전 제트의 속도, 2.7 m/s보다 상당히 높은 값을 보이고 있다. 따라서, 액막 속도를 충돌 전 제트 속도로 가정한 기존의 연구 결과와는 많은 차이점을 보여주고 있다.

Figure 6은 충돌각의 변화에 따른 액막의 속도 분포 변화를 방위각에 따라 나타낸 결과이다. Figure 5에서 알 수 있듯이, 동일 방위각에서 반경 방향으로의 액막 속도 변화는 방위각이 아주 큰 경우를 제외하고는 그다지 크지 않기 때문에,

임의 방위각에서의 액막 속도는 반경 방향 측정 속도의 평균값으로 하였다. Figure 5에서도 알 수 있듯이, 모든 충돌각에서 방위각이 증가할수록 액막의 평균 속도는 감소하는 것을 알 수 있다.

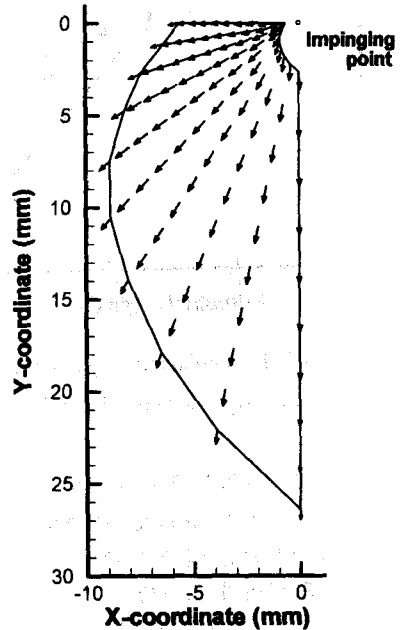


Fig. 4 Distribution of the sheet velocity vector on the overall liquid sheet for $D_j=1.0$ mm, $\theta=60^\circ$, $V_j=2.7$ m/s.

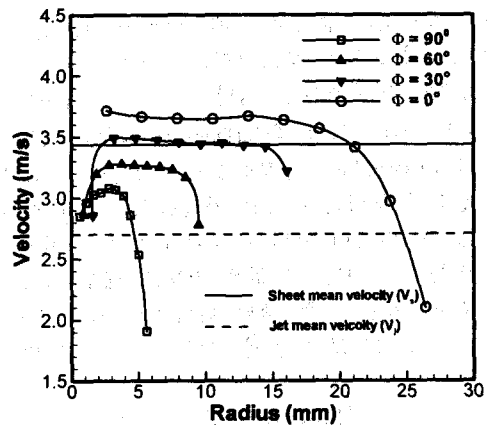


Fig. 5 Distribution of the sheet velocity for $D_j=1.0$ mm, $\theta=60^\circ$, $V_j=2.7$ m/s.

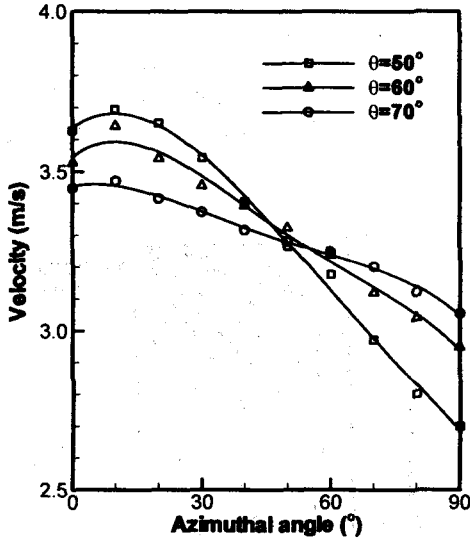


Fig. 6 Effect of the impinging angle on the sheet velocity for $D_j=1.0$ mm, $V_j=2.7$ m/s.

또한, 충돌각이 증가할수록 $\phi=0^\circ$ 주변에서의 액막 속도는 감소하고, $\phi=90^\circ$ 주변에서의 속도는 증가함으로 인하여, 액막 전체에 걸쳐서 공간적인 액막 속도 차이가 감소함을 확인할 수 있는데, 이는 충돌각이 액막 속도 분포에 미치는 영향을 언급한 Dombrowski⁽²⁾의 결과와도 매우 일치하고 있다. 즉, 그들은 충돌각이 작은 경우(50° 이내), 액막의 중심축 주변으로는 빠른 속도 영역이 형성되고 그 주변으로 느린 속도 영역이 형성된다고 하였으며, 충돌각이 큰 경우에는 충돌점에서의 충돌력의 증가로 인해 액막 전체에 걸쳐 액막 속도가 고르게 분포한다고 하였다.

기존의 연구에서는 액막의 속도를 예측할 때 $\phi=0^\circ$ 에서의 액막 속도(Dombrowski⁽²⁾), 또는 액적 속도(Ryan⁽⁴⁾)를 측정하였고, 이를 이론 해석에 필요한 액막의 속도로 가정했으나, Fig. 5, 6에서 알 수 있듯이 액막의 방위각 변화에 따른 속도 변화가 무시할 수 없을 정도로 매우 큼을 알 수 있다. 또한, 모든 액막 위치에서 액막 속도는 항상 제트 속도보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Figure 7은 제트의 속도 증가에 따른 액막에서의 평균 속도를 나타낸 것이다. 측정 영역 내에서 액막의 평균 속도는 제트 속도에 선형적으로

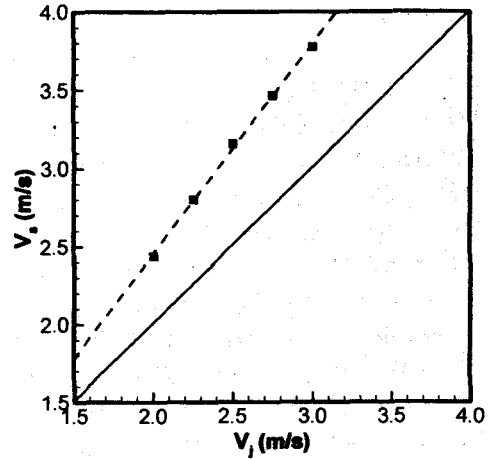


Fig. 7 Effect of the jet velocity on the mean sheet velocity for $D_j=1.0$ mm, $\theta=60^\circ$. The solid line represents the mean sheet velocity(V_s) equals the jet velocity(V_j).

증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 액막의 평균 속도는 항상 제트 속도보다 높게 나타나며, 그 차이도 제트 속도의 증가에 따라, 증가함을 알 수 있어, 액막의 속도를 제트 속도로 가정한 기존의 연구 결과와는 차이가 있음을 보여 주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 충돌제트에 의해 형성되는 액막 속도를 액막의 여러 위치에서 LDV를 이용하여, 직접적으로 측정, 액막의 위치에 따른 공간적 속도 분포를 구하고, 충돌각, 제트 속도 변화가 액막 속도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 액막 속도의 공간 분포를 보면, 액막 중심축에서 가장 높은 액막 속도를 가지고, 방위각이 증가할수록 액막 속도는 감소하였다. 하지만, 충돌각이 증가할수록 방위각에 따른 액막 속도 차이는 감소하였다. 제트 속도 증가에 따라 평균 액막 속도도 선형적으로 증가하였지만, 액막 속도를 제트 속도로 가정한 기존 연구와는 다르게 액막 속도는 제트 속도보다 항상 높은 값을 가지고 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 1998년도 전남대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Taylor, F. R. S., 1960, "Formation of Thin Flat Sheets Of Water," *Proc. Roy. Soc. of London*, Vol. 259, pp. 1~17.
- (2) Dombrowski, N. and Hooper, P. C., 1963, "A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 18, Part 3, pp. 392~440.
- (3) Anderson, W. E., Ryan, H. M., Pal, S., Santoro, R. J., 1992, "Fundamental Studies of Impinging Liquid Jets," *AIAA. Paper* 92-0458, Jan.
- (4) Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S. and Santoro, R. J., 1994, "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 1, pp. 135~145.
- (5) Lefebvre, A. H., 1989, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, PA, pp. 45~48.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 추연준, 강보선, 2000, "충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 두께 특성에 관한 연구," *대한기계학회 논문집 B권*, 제 24권, 2호, pp. 214~223.
- (9) Sutton, G. P., 1992, *Rocket Propulsion Element: An Introduction to the Engineering of Rockets*, John Wiley & Sons, pp. 298~311.