

벽 충돌 제트로 생성되는 액막의 두께 분포 특성 연구

이진성* · 이태영* · 조정민* · 강보선†

A Study on the Thickness Characteristics of the Liquid Sheet Formed by an Impinging Jet Onto a Wall

J. S. Lee, T. Y. Lee, J. M. Jo, and B. S. Kang

Key Words: Impinging jet(충돌 제트), Wall(벽), Liquid sheet thickness(액막 두께)

Abstract

In this study, the thickness of the liquid sheet formed by a low speed impinging jet onto a wall was measured by the direct contact method. The spatial distribution characteristics of the sheet thickness in the radial and circumferential directions, and the effects of jet velocity and liquid viscosity were analyzed. The measurement results were compared with the theoretical predictions for two impinging jets. The wavy surface was observed for low viscosity water, but not for high viscosity glycerol solutions. The sheet thickness decreased as the circumferential angle or the distance from the impinging point increased. The sheet thickness increased as the liquid viscosity increased. Comparison with the theoretical predictions showed some differences from the measurement results.

1. 서 론

액체를 미립화시켜 분무를 생성하는 다양한 방법 중에서 충돌 제트를 이용하는 방법이 있다. 충돌 제트로 형성되는 액막은 두 제트가 서로 상호 충돌하는 경우, 제트가 평면벽에 충돌하는 경우, 제트가 충돌점 주변의 고체벽에 충돌하는 경우에 형성된다. 형성된 액막의 분열을 통하여 액체를 미립화시키는 방법은 상호 충돌 제트의 경우에는 충돌 제트 인젝터(impinging jet injector), 벽 충돌 제트의 경우에는 충돌판 노즐(splash plate nozzle)에서 많이 활용되고 있다.

충돌 제트 인젝터는 고속의 두 개의 제트가 서로 충돌하면서, 그 충돌의 힘에 의하여 액체를 미립화시키는

인젝터로써, 가공, 제작의 단순성, 분사 연료의 미립화 및 혼합 특성의 우수성으로 인하여, 액체 연료를 사용하는 로켓 엔진에서 많이 이용되고 있다. 저속 제트에 의해 형성되는 액막의 특성과 관련하여, 액막 두께에 관한 이론적인 모델링은 Ranz⁽¹⁾, Miller⁽²⁾, Hasson과 Peck⁽³⁾, Ibrahim과 Przekwas⁽⁴⁾, Li와 Ashgriz⁽⁵⁾ 등에 의해 수행되었다. 액막 두께에 관한 실험적인 연구로 Taylor⁽⁶⁾는 액체채집법, Shen과 Poulidakos⁽⁷⁾, Choo와 Kang⁽⁸⁾은 광학적 간섭법, 한명준 등⁽⁹⁾은 직접접촉법을 사용하였다.

충돌판 노즐은 고속 단일 제트를 좁은 면적의 고체벽에 충돌시켜 미립화시킴으로써 선형 분무(fan spray)를 형성한다. 이 노즐은 제지산업의 크래프트 회수보일러에서 점도가 높으면서 고체 입자가 섞인 흑액(black liquor)을 분무하기 위해 활용되고 있다. Ahmed 등⁽¹⁰⁾은 물과 옥수수 시럽을 사용하여 다양한 충돌판 노즐의 분무 특성을 연구하였다.

충돌판 노즐의 분무 특성을 모델링하기 위하여 Inamura와 Yanaoka⁽¹¹⁾는 평면벽에 경사지게 충돌하는 제트에 의해 형성되는 액막의 특성을 벽 위에 형성되는

(Received: 27 Apr 2023, Received in revised form: 29 May 2023, Accepted: 30 May 2023)

*전남대학교 기계공학부

†책임저자, 전남대학교 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

TEL: (062)530-1683 FAX: (062)530-1689

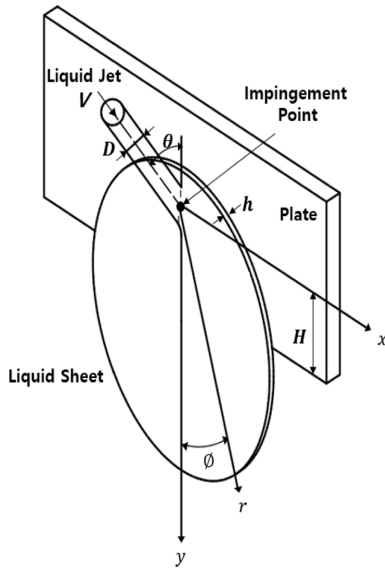


Fig. 1 Liquid sheet formed by an impinging jet onto a wall

경계층 분석을 기반으로 하여 액막 속도와 두께를 모델링하였다. Sarchami와 Ashgriz⁽¹²⁾는 충돌판 노즐에 의한 분무 미립화 모델을 수립하기 위해, 초기 생성 액적의 크기와 속도를 Inamura와 Yanaoka⁽¹¹⁾가 제안한 액막 속도와 두께를 이용하여 예측하였다. 김민석⁽¹³⁾ 등은 평판 충돌 제트로 생성되는 액막의 두께를 직접접촉법으로 측정하였다.

충돌 제트로 형성되는 액막의 분열을 이용하는 노즐의 경우, 생성 액적의 크기, 속도 등과 같은 분무 특성은 충돌점 주변에 형성되는 분열 전 액막의 특성에 의해 많은 영향을 받는다. 특히, 액막 두께에 관한 정보는 액막의 미립화로 형성되는 액적 크기를 결정하는데 가장 기본적인 자료로써 이용되는 만큼, 이에 대한 신뢰할 만한 실험적 연구 결과가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 것처럼, 직경 D , 속도 V 의 단일 제트가 충돌각 θ 로 충돌점 주변의 고체벽에 충돌하는 경우에 생성되는 액막의 특성에 대하여 연구하였다.

생성되는 액막의 모양과 두께에 대한 이론적인 모델링은 벽 충돌 제트와 가장 유사한 상황으로 간주할 수 있는 상호 충돌 제트의 경우를 사용하였다. Hasson과 Peck⁽³⁾과 Ibrahim과 Przekwas⁽⁴⁾의 액막 두께 식은 다음과 같으며, 구체적인 이론적 분석은 참고문헌을 참조하기 바란다.

$$\frac{hr}{R^2} = \frac{\sin^3 \theta}{(1 - \cos \phi \cos \theta)^2} \quad (1)$$

$$\frac{hr}{R^2} = \frac{\beta e^{\beta(1-\phi/\pi)}}{e^\beta - 1} \quad (2)$$

실험적으로는 벽 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 형태를 가시화하고, 액막 두께를 직접접촉법을 사용하여 측정하였으며, 측정된 액막 모양과 두께를 이론적 예측식과 비교하였다.

2. 실험 장치 및 조건

본 연구의 실험 장치는 Fig. 2에 나타난 것처럼, 벽에 액막을 형성하는 충돌 제트 장치, 액막 형상을 가시화하는 장치, 액막 두께를 측정하는 장치로 구성되어 있다. 액체는 물과 글리세롤 수용액을 사용하였다. 안정된 액체의 공급을 위하여 고압 질소로 가압되는 압력 탱크로부터 액체가 유량계, 유량조절밸브, 압력계를 거쳐 유리관에서 제트가 분사하여 액막을 형성한다. 안정된 층류 액체 제트를 형성하기 위하여, 표면 거칠기 영향을 최소화한 정밀가공된 유리관을 사용하였다. 유리관은 내경이 1.5 mm이고, 충분히 발달된 제트를 형성하기 위하여 길이는 직경에 비해 상대적으로 긴 15.24 cm이다. 제트가 충돌하는 벽은 아크릴 재질로 가로 10 cm, 세로 4.3 cm, 두께 1 mm이며, 제트는 벽 하단에서 2.5 mm 상부 위치에 충돌하게 된다.

액막 형상의 가시화는 액막 후방에 놓인 Stroboscope (V-tex, DX525A)를 광원으로 하여 CCD 카메라(Redlake MegaPlusII, ES4020)를 이용해 액막 이미지를 획득하였다. 밝고 균일한 배경을 만들기 위하여 광원 앞에 산란판(diffuser)을 설치하였다. 액막 두께 측정은 바늘을 액

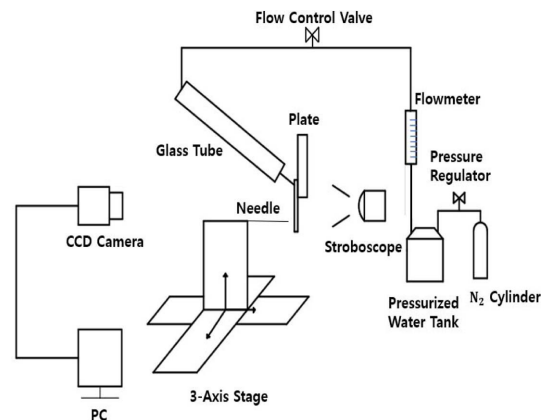


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Physical properties of liquids

Properties Liquid	Density (kg/m ³)	Viscosity (N s/m ²)	Surface Tension ×10 ³ (N/m)
Water	1001.0 (1.00)	1.002 (1.00)	72.09 (1.00)
50% Glycerol	1141.1 (1.14)	6.15 (6.14)	68.48 (0.95)
59% Glycerol	1151.2 (1.15)	9.97 (9.95)	66.30 (0.92)
68% Glycerol	1211.2 (1.21)	20.51 (20.47)	65.60 (0.91)

막 표면에 접촉하는 순간까지 3축 이송장치(PI, M521, 분해능=33 nm/count)로 정밀하게 이송시켜서 이동거리로부터 두께를 계산하였다. 날카로운 바늘이 액막 표면에 접촉하는 순간에 형성되는 액막 표면의 깨짐현상을 이용하여 두께를 측정하였다.

본 연구에서는 액체의 점도가 액막 두께에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 글리세린과 물의 혼합액을 사용하였으며, 글리세린의 중량비로써 액체의 점도를 변화시켰다. Table 1은 사용한 액체의 물성치를 나타낸 것이며, 괄호 안의 값은 물과의 상대적 값을 나타낸다. 유체의 점도는 글리세린의 중량비가 50%, 59%, 68%일 때, 물의 점도를 기준으로 각각 약 6, 10, 20 배로 증가하였다. 밀도는 비커를 이용해 부피와 질량을 측정해 계산하였고, 점도는 오스트발트(Ostwald) 점도계를 사용하여 물과의 상대적 점도를 측정하였다. 표면장력은 모세관에 매달린 액적의 이미지로부터 프로그램(ImageJ)을 사용하여 계산하였다.

실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 벽과 제트의 충돌점을 원점으로 설정하였다. 물의 경우 원주각 $\phi=0\sim60^\circ$ 까지 15° 간격으로, 글리세린 수용액은 원주각 $\phi=0^\circ$ 에서 측정하였다. 반지름 방향으로는 두께 변화가 심한

2~3 cm까지는 0.5 cm 간격, 그 이후부터는 1 cm 간격으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 벽에 충돌하는 제트에 의해 형성되는 전형적인 액막을 보여주고 있다. 액체는 물이고 제트의 속도를 증가시켜가며 액막을 가시화하였다. 제트의 속도가 5 m/s 이하에서는 충돌점 주변으로 나뭇잎 모양의 액막이 형성되고, 제트 속도가 더 높아지면 액막 하단부가 더 이상 모여지지 못하고 깨짐 현상이 발생하였다. 액막 표면에는 충돌점으로부터 파생되는 파형과 같은 물결이 생성되었다. 액막의 가장자리에는 가느다란 림이 형성되고 림 내부를 흐르는 유체의 불규칙한 흐름으로 인하여 림 구조가 불규칙적인 형태를 띠고 있다. 이 림으로부터 작은 크기의 많은 액적들이 분열되고 있다.

Figure 4는 액체가 글리세린 수용액으로써, 액체의 점도가 증가할수록 파형이 나타났던 물과 비교하여 액막의 표면은 매끄럽게 형성되었다. 액막의 가장자리에 생성되는 림도 거의 동일한 직경으로 경계도 매우 매끈하게 형성이 되며, 림으로부터 분열되는 액적의 수도 물보다 극히 적었다. 점도가 증가할수록 액막의 길이와 폭은 증가하였다. 충돌점 주변에 형성되는 액막의 림은 벽과의 마찰로 인하여 액막 하부보다는 두꺼운 림이 형성된다.

Figure 5는 서로 다른 방법에 의해 형성되는 액막의 특성을 비교하였다. Fig. 5(a)는 벽 충돌 제트, Fig. 5(b)는 평판 충돌 제트⁽¹³⁾, Fig. 5(c)는 상호 충돌 제트⁽⁹⁾에 의해 형성되는 액막이다. 액막 두께와 속도에 영향을 미치는 액막과 고체벽 사이의 접촉 면적은 벽 충돌 제트는 충돌점 주변 액막 상부, 평판 충돌 제트는 액막 한쪽 면

Table 2 Test conditions

Liquid	D (mm)	θ (°)	ϕ (°)	V (m/s)
Water	1.5	30	0~60	2.01~8.56
50% Glycerol			0	2.05~4.02
59% Glycerol				
68% Glycerol				

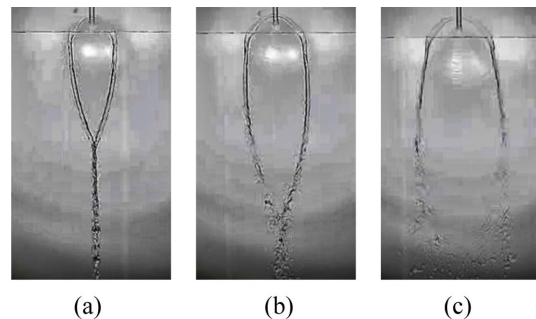


Fig. 3 Shape of liquid sheets for water; (a) $V=3.39$ m/s, (b) $V=4.69$ m/s, (c) $V=7.27$ m/s

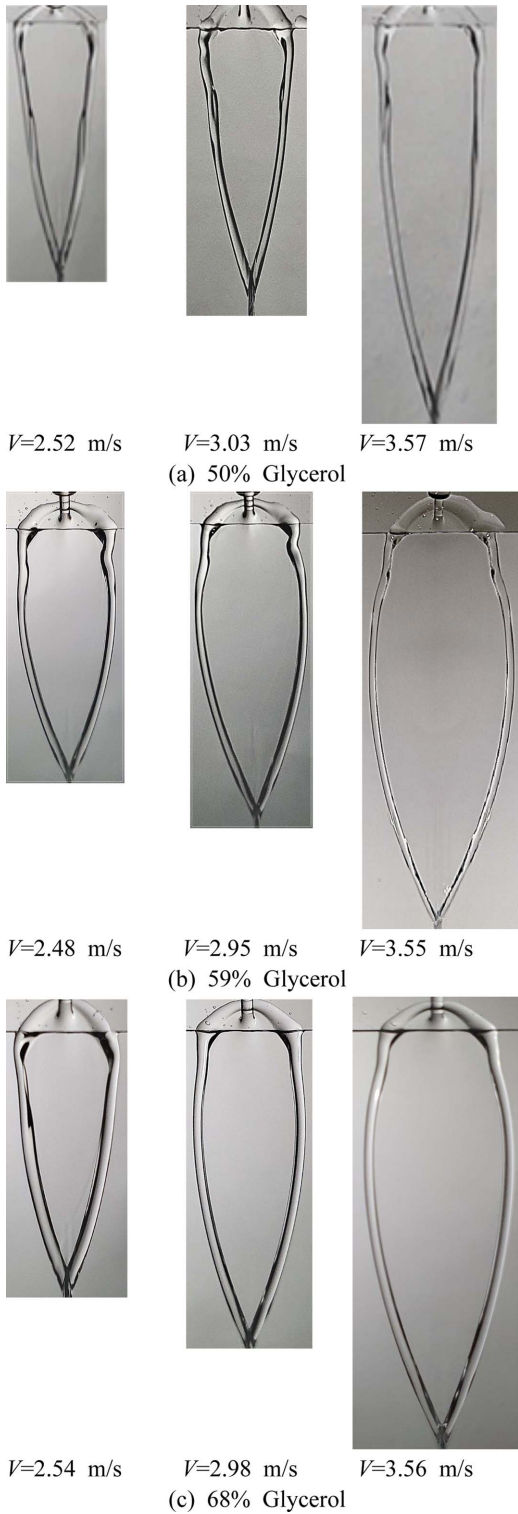


Fig. 4 Shape of liquid sheets for; (a) 50% Glycerol, (b) 59% Glycerol, (c) 68% Glycerol

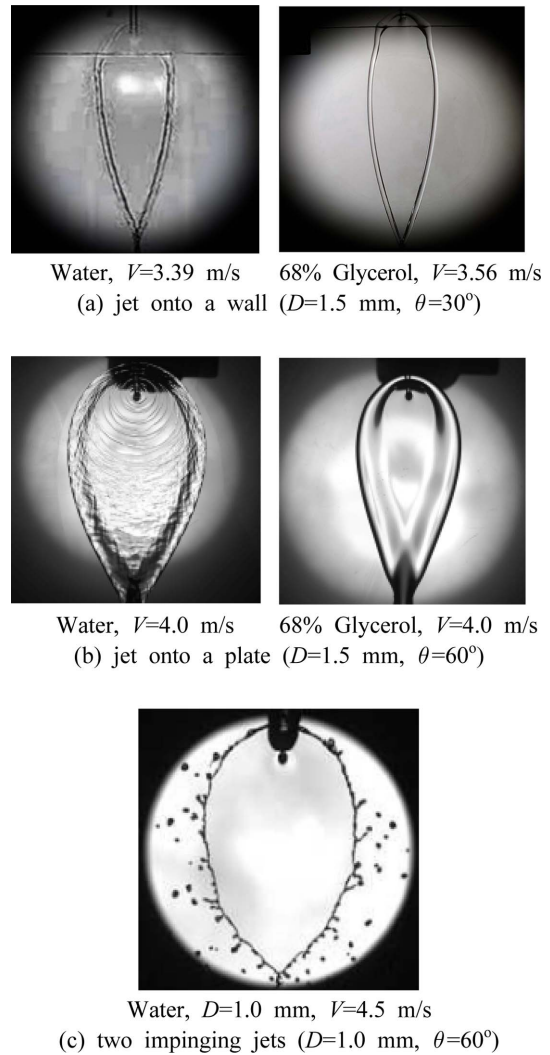


Fig. 5 Comparison of liquid sheets formed by different methods; (a) jet onto a wall, (b) jet onto a plate⁽¹³⁾, (c) two impinging jets⁽⁹⁾

전체, 상호 충돌 제트는 없으며, 이로 인해 생성되는 액막의 특성에 차이가 나타난다. 벽 충돌 제트에 의해 형성되는 액막은 물의 경우에 액막 표면에 파동이 형성되고, 액막 가장자리에 얇은 직경의 림이 불규칙하게 흐르며, 림으로부터 다수의 액적이 분열된다. 글리세롤의 경우는 매끈한 액막 표면, 규칙적인 림 흐름, 림으로부터 매우 소수의 분열 액적의 특성이 나타난다. 반면에, 평면 제트의 경우는 림의 크기가 가장 크며, 그로 인해 림으로부터 분열되는 액적은 없다. 상호 충돌 제트의 경우는 물의 경우에도 액막 표면에 파형이 나타나지 않고,

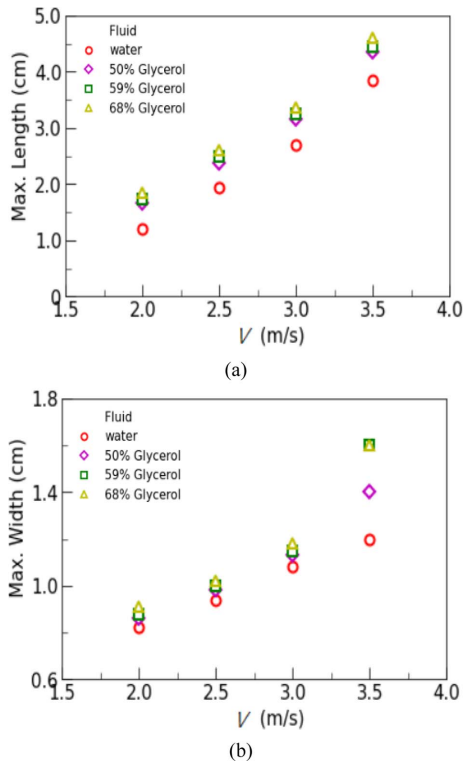


Fig. 6 Maximum length and width of liquid sheet for different fluids; (a) maximum length, (b) maximum width

림의 크기가 가장 적으며, 림으로부터 분열되는 액적도 많은 편이다.

액막 가장자리 림 부분을 제외한 액막의 모양에 대해 액막의 최대 길이와 폭을 Fig. 6에 나타내었다. 제트의 속도가 증가함에 따라 액막의 길이와 폭은 증가하였으며, 길이의 증가는 큰 반면, 폭의 증가는 크지 않았다. 점도가 낮은 물의 경우, 최대 길이와 폭이 가장 짧으며, 액체의 점도가 증가할수록 액막의 길이와 폭도 증가하였다. 글리세롤 수용액의 경우, 점도의 변화는 큰 반면에 최대 길이와 폭의 변화는 그렇게 크지는 않았다.

Figure 7은 벽 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 모양(오른쪽)을 상호 충돌 제트의 이론적 모델링(Ibrahim과 Przekwas⁽⁴⁾, 왼쪽)과 비교하였다. 액막의 폭은 유사하게 예측되었지만, 액막의 길이는 물의 경우는 약간 길게, 글리세롤 수용액의 경우는 매우 길게 예측되었다.

Figure 8은 액체는 물이고 제트 속도 $V=4.69$ m/s일 때, 반지름 위치(Fig. 8a)와 원주각 변화(Fig. 8b)에 따른 액막 두께를 나타내고 있다. 두께 예측 식 (1), (2)에서도

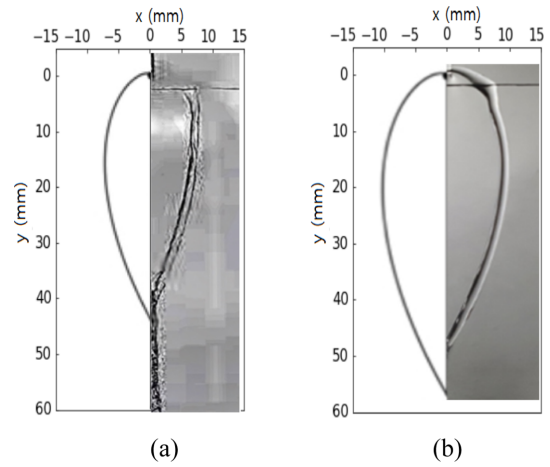


Fig. 7 Comparison of shape of liquid sheets between predictions and experiments with $V=3.6$ m/s; (a) water, (b) 68% Glycerol

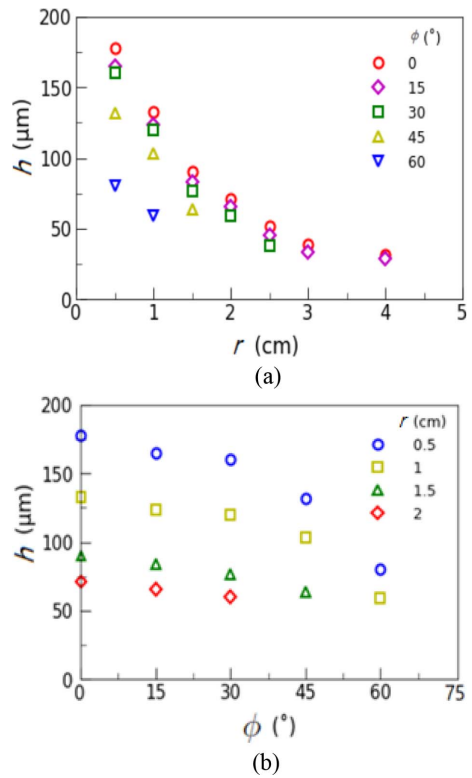


Fig. 8 Variation of sheet thickness for water, $D=1.5$ mm, $V=4.69$ m/s; (a) with change of radius, (b) with change of circumferential angle

알 수 있듯이, 액막 두께는 충돌점으로부터의 반지름에 반비례하여 감소함을 모든 원주각에 대해서 확인할 수 있

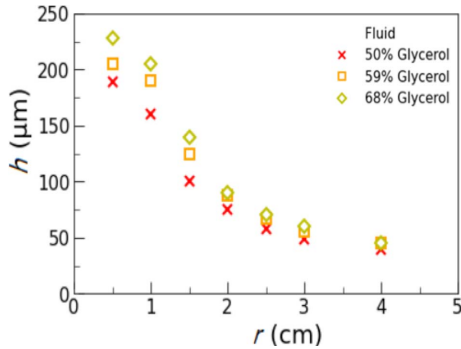


Fig. 9 Variation of sheet thickness for Glycerols with $V=3.6$ m/s, $\phi=0^\circ$

다. 충돌점 주변에서는 액막 두께가 두꺼워 80~180 μm 정도이지만, 반지름이 증가할수록 두께가 얇아지며, 액막 가장자리에서는 30~50 μm 정도까지 얇아지게 된다. 또한, 동일 반지름 위치에서는 원주각이 작을수록 두께가 더 두껍게 나타난다. Fig. 8(b)에서 액막 두께는 동일 반지름에서 원주각이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 원주각 $\phi \leq 45^\circ$ 까지는 거의 선형적으로 감소하다가, 그 이후부터는 두께 변화가 크게 나타난다.

Figure 9는 액체의 점도 변화가 액막 두께에 미치는 영향을 나타내고 있다. 액체는 글리세롤 수용액이며 제트 속도 $V=3.6$ m/s이다. 상호 충돌 제트에 의한 액막 두께에 대한 이론적 예측식(예: 식 (1), (2) 등)은 액막 두께가 유체의 물성치와 무관함을 나타낸다. 하지만, 측정된 액막 두께는 액체의 점도 변화에 따라 확실하게 차이가 있음을 보여주고 있다. 액막 두께는 점도가 증가할수록 증가하였으며, 특히 충돌점에서 가까운 지점 ($r \leq 1.5$ cm)에서는 점도 변화에 따른 액막 두께 변화가

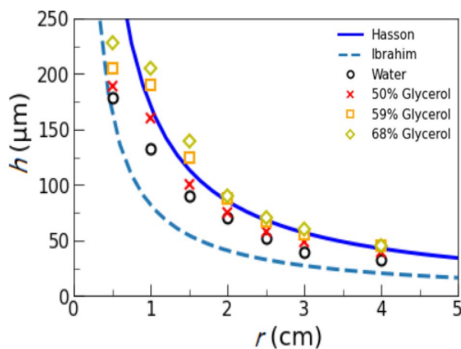


Fig. 10 Comparison of measured sheet thickness with theoretical predictions for $V=4.69$ m/s (water), $V=3.6$ m/s (glycerol), $\phi=0^\circ$

크게 나타났다. 하지만 충돌점에서 멀어질수록 점도 변화의 영향은 거의 없어짐을 알 수 있다.

Figure 10은 측정된 액막 두께를 상호 충돌 제트의 이론적 두께 예측식(실선: Hasson과 Peck⁽³⁾, 점선: Ibrahim과 Przekwas⁽⁴⁾)과 비교하였다. Ibrahim의 두께 예측식은 측정값보다 항상 낮게 예측하였으며, Hasson의 두께 예측식은 점도가 낮은 물의 경우는 높게 예측하였지만, 점도가 높은 글리세롤 수용액은 거의 유사하게 예측하고 있다. 이론적 두께 예측식은 액체의 점도에 따라 측정값과는 차이가 있지만, 전반적인 두께 변화 경향은 적절히 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 벽에 충돌하는 제트에 의해 형성되는 액막을 가시화하고 액막 두께를 직접접촉법에 의하여 측정하였다. 제트 속도와 액체 점성이 액막 두께에 미치는 영향을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 물의 경우 액막 표면에 파형이 나타나고 불규칙한 흐름의 림과 림으로부터 다수의 액적이 분열된다. 반면, 글리세롤의 경우 매끄러운 액막 표면, 안정된 흐름의 림과 소수의 액적이 분열된다.
- (2) 액막 두께는 반지름에 반비례하여 감소하고, 원주각이 증가할수록 감소하였다. 충돌점 주변과 액막 중심축에서 액막 두께가 가장 두꺼웠다.
- (3) 액체의 점도가 증가할수록 액막의 두께는 증가하였으며, 충돌점 주변에서 차이가 심하고 멀어질수록 차이가 감소하였다.
- (4) 상호 충돌 제트의 이론적 두께 예측식은 액체의 점도에 따라 측정값과는 차이가 있지만, 두께 변화 경향을 근사적으로는 나타내었다.

참고문헌

- (1) W. E. Ranz, "Some experiments on the dynamics of liquid films," J. of Applied Physics, Vol. 30, 1959, pp. 1950~1955.
- (2) K. D. Miller, "Distribution of spray from impinging liquid jets," J. of Applied Physics, Vol. 31, 1960, pp. 1132~1133.
- (3) D. Hasson and R. E. Peck, "Thickness distribution in a sheet formed by impinging jets," A.I.Ch.E. J., Vol. 10,

- 1964, pp. 752~754.
- (4) E. A. Ibrahim and A. J. Przekwas, "Impinging jets atomization," *Phys. Fluids*, Vol. 3, 1991, pp. 2981~2987.
- (5) R. Li and N. Ashgriz, "Characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets," *Phys. Fluids*, Vol. 18, 2006, 087104.
- (6) F. R. S. Taylor, "Formation of thin flat sheets of water," *Proc. Roy. Soc. of London*, Vol. 259, 1960, pp. 1~17.
- (7) Y. B. Shen and D. Poulikakos, "Thickness variation of liquid sheet formed by two impinging jets using holographic interferometry," *J. Fluids Eng.*, Vol. 120, 1998, pp. 482~487.
- (8) Y. J. Choo and B. S. Kang, "Parametric study on impinging-jet liquid sheet thickness distribution using an interferometric method," *Exp. in Fluids*, Vol. 31, 2001, pp. 56~62.
- (9) 한명준, 전영우, 서태원, 강보선, "지속 충돌 제트로 생성되는 액막의 두께 분포 특성 연구," *한국분무공학회지*, 제26권 제1호, 2021, pp. 26~32.
- (10) M. Ahmed, A. Amighi and N. Ashgriz, "Characteristics of liquid sheets formed by splash plate nozzles," *Exp. in Fluids*, Vol. 44, 2008, pp. 125~136.
- (11) T. Inamura and H. Yanaoka, "Prediction of mean droplet size of sprays issued from wall impingement injector," *AIAA J.*, Vol. 42, 2004, pp. 614~621.
- (12) A. Sarchami and N. Ashgriz, "An atomization model for splash plate nozzles," *AIChE J.*, Vol. 56, 2010, pp. 849~857.
- (13) 김민석, 오진형, 정희민, 강보선, "평판 충돌 제트로 생성되는 액막의 두께 분포 특성 연구," *한국분무공학회지*, 제27권 제2호, 2022, pp. 77~83.