

## 충돌벽 노즐의 저속 제트에 의한 액막 특성 연구

박희웅\* · 김지담\* · 송가은\* · 강보선†

### A Study on the Characteristics of the Liquid Sheet Formed by a Splash Plate Nozzle at Low Jet Velocities

H. U. Park, J. D. Kim, G. E. Song, and B. S. Kang

**Key Words:** Splash plate nozzle(충돌벽 노즐), Impinging jet injector(충돌 제트 인젝터), Liquid Sheet(액막)

#### Abstract

In this study, the thickness of the liquid sheet formed by a splash plate nozzle at low jet velocities 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 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 for two impinging jets showed some differences from the measurement results.

#### 1. 서 론

액체를 미립화시켜 분무를 생성하는 다양한 방법 중에서 충돌 제트를 이용하는 방법이 있다. Fig. 1에 나타난 것과 같이, 제트가 상호 충돌, 평면에 충돌, 벽에 충돌하는 경우에, 제트 속도가 낮으면 충돌점 주변에 액막이 형성된다. 제트 속도가 높아지면 액막의 분열을 통하여 액체를 미립화시키며, 상호 충돌 제트는 충돌 제트 인젝터(impinging jet injector), 벽 충돌 제트는 충돌벽 노즐(splash plate nozzle)에서 많이 활용되고 있다.

충돌 제트 인젝터는 고속의 두 제트가 서로 충돌하면서 액체를 미립화시키는 인젝터로서, 가공, 제작의 단순성, 분사 연료의 미립화 및 혼합 특성의 우수성으로 인

하여, 액체 연료를 사용하는 로켓 엔진에서 많이 이용되고 있다. 저속 제트에 의해 형성되는 액막의 특성과 관련하여, 액막 두께에 관한 이론적인 모델링은 Ranz<sup>(1)</sup>, Miller<sup>(2)</sup>, Hasson과 Peck<sup>(3)</sup>, Ibrahim과 Przekwas<sup>(4)</sup>, Li와 Ashgriz<sup>(5)</sup> 등에 의해 수행되었다. 액막 두께에 관한 실험적인 연구로 Taylor<sup>(6)</sup>는 액체채집법, Shen과 Poulidakos<sup>(7)</sup>, Choo와 Kang<sup>(8)</sup>은 광학적 간섭법, 한명준 등<sup>(9)</sup>은 직접접촉법을 사용하였다.

충돌벽 노즐은 고속 단일 제트를 작은 면적의 벽에 충돌시켜 미립화시킴으로써 선형 분무(fan spray)를 형성한다. 이 노즐은 제지산업의 크래프트 회수보일러에서 점도가 높으면서 고체입자가 섞인 흑액(black liquor)을 분무하기 위해 활용되고 있다. Ahmed 등<sup>(10)</sup>은 물과 옥수수시럽을 사용하여 다양한 충돌벽 노즐의 분무 특성을 연구하였다.

충돌벽 노즐의 분무 특성을 모델링하기 위하여 Inamura와 Yanaoka<sup>(11)</sup>는 평면벽에 경사지게 충돌하는 제트에 의해 형성되는 액막의 특성을 벽 위에 형성되는 경계층 분석을 기반으로 하여 액막 속도와 두께를 모델

(Received: 22 Apr 2024, Received in revised form: 20 May 2024, Accepted: 30 May 2024)

\*전남대학교 기계공학부

†책임저자, 전남대학교 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

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

링하였다. Sarchami와 Ashgriz<sup>(12)</sup>는 생성 액적의 크기와 속도를 Inamura와 Yanaoka<sup>(11)</sup>가 제안한 액막 속도와 두께를 이용하여 예측하였다. 김민석<sup>(13)</sup> 등은 평판 충돌 제트로 생성되는 액막 두께를 직접접촉법으로 측정하였다.

충돌 제트로 형성되는 액막의 분열을 이용하는 분무의 경우, 생성 액적의 크기, 속도 등과 같은 분무 특성은, 충돌점 주변에 형성되는 분열 전 액막의 특성에 의해 많은 영향을 받는다. 특히, 액막 두께  $h$ 는 액적 크기를 결정하는데 가장 기본적인 자료로써 이용되는 만큼, 이에 대한 신뢰할만한 실험적 연구결과가 필요하다. 하지만, 충돌벽 노즐의 액막 두께를 실험적으로 측정하는 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 Fig. 1(c)에 나타낸 것처럼, 직경  $D$ , 속도  $V$ 의 단일 제트가 충돌각  $\theta$ 로 벽에 충돌하는 충돌벽 노즐의 저속 제트에 의해 생성되는 액막의 특성에 대하여 연구하였다. Fig. 1에서  $x, y$ 는 수평, 수직 좌표,  $r, \phi$ 는 반지름, 원주각 좌표이다.

생성되는 액막의 모양과 두께에 대한 이론적인 모델링은 가장 유사한 상황으로 간주할 수 있는 상호 충돌 제트의 경우를 사용하였다. Hasson과 Peck<sup>(3)</sup>과 Ibrahim과 Przekwas<sup>(4)</sup>의 액막 두께 식은 다음과 같으며, 구체적

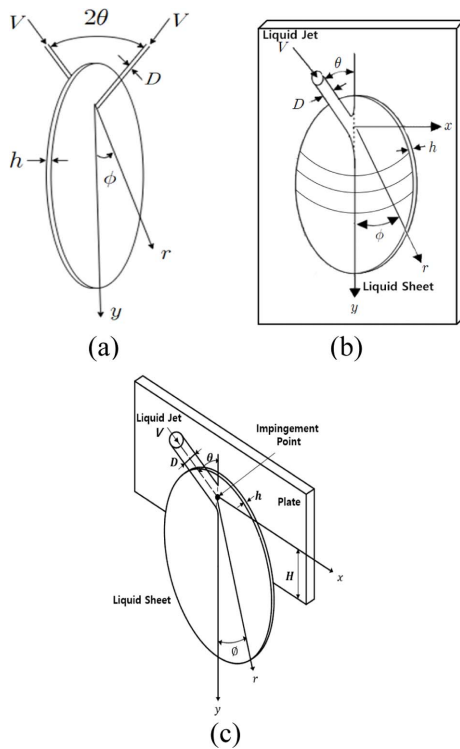


Fig. 1 Liquid sheets formed by impinging jets; (a) two jets, (b) jet-on-plate, (c) jet-on-wall

인 이론적 내용은 참고문헌을 참조하기 바란다.

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

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

$R$ 은 제트의 반지름,  $\beta$ 는 다음 식에 의해서 결정된다.

$$\cos \theta = \left( \frac{e^{\beta}+1}{e^{\beta}-1} \right) \frac{1}{1+(\pi/\beta)^2} \quad (3)$$

실험적으로는 충돌벽 노즐의 저속 제트에 의해 형성되는 액막의 형태를 가시화하고, 액막 두께를 직접접촉법을 사용하여 측정하였으며, 측정된 액막 모양과 두께를 상호 충돌 제트의 이론적 예측과 비교하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 조건

실험 장치는 Fig. 2에 나타낸 것처럼, 충돌벽 노즐의 저속 제트에 의한 액막 생성 시스템, 액막 형상을 가시화하는 광학시스템, 액막 두께를 측정하는 시스템으로 구성되어 있다. 액체는 물과 글리세롤 수용액을 사용하였다. 안정된 액체의 공급을 위하여, 고압 질소에 의하여 가압되는 액체저장용기로부터 액체가 유량계와 유량 조절밸브, 압력계를 거쳐 충돌벽 노즐에 공급된다.

실험에 사용된 충돌벽 노즐(FloodJet, Spraying Systems Co.)은 Fig. 3에 나타내었고, 상세 사양은 Table 1에 표시하였다. 노즐을 통과하는 제트는 Fig. 3(c)에 두꺼운 푸른 선으로 표시하였다. 액막형상의 가시화는 액막 후방에 놓인 Stroboscope (V-tek, DX525A)를 광원으로 하여 CCD 카메라(Redlake MegaPlusII, ES4020, 2,048

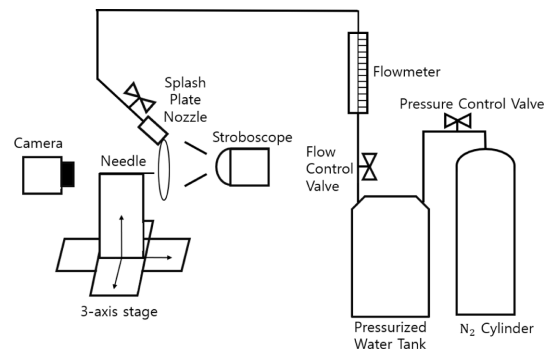


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

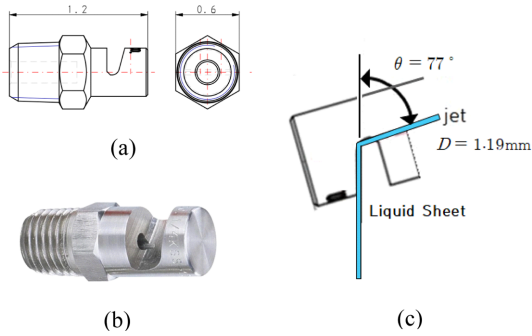


Fig. 3 Splash plate nozzle; (a) dimensions, (b) photograph, (c) schematics of impinging jet

Table 1 Specification of splash plate nozzle

Impingement Angle	$\theta = 77^\circ$
Jet Diameter	1.19 mm
Spray Angle	$83^\circ \sim 129^\circ$
Flow Rate	0.011~0.031 ml/sec
Drop Size	100~5,000 $\mu\text{m}$

$\times 2,048$  pixels)를 이용하여 액막 이미지를 획득하였다. 밝고 균일한 배경을 만들기 위하여, 광원 앞에 산란판(diffuser)을 설치하였다.

액막 두께 측정은 바늘을 액막 표면에 접촉하는 순간까지 3축 이송장치(PI, M521, 분해능= 33 nm/count)로 정밀하게 이송시켜서 그 위치로부터 두께를 계산하였다. 날카로운 바늘이 액막에 흔적이 나타나지 않지만, 한 카운트를 이동시켜서 액막에 접촉하면, 바늘이 액막 유동을 방해하기 때문에 액막 표면에 접촉 흔적이 나타난다.

액체의 점도가 액막 두께에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 글리세롤과 물의 혼합액을 사용하였으며, 글리세롤의 중량비로써 점도를 변화시켰다. Table 2는 사용

Table 2 Physical properties of liquids

Properties Liquid	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosity (N·s/m <sup>3</sup> )	Surface Tension $\times 10^3$ (N/m)
Water	1001.0 (1.00)	1.002 (1.00)	72.09 (1.00)
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)

액체의 물성치를 나타낸 것이며, 괄호 안 값은 물과의 상대적 값을 나타낸다. 점도는 글리세롤의 중량비를 59%, 68%로 하였을 때, 물의 점도를 기준으로 10, 20 배로 증가하였다. 밀도는 비커를 이용하여 부피와 질량을 측정하였고, 점도는 오스트발트(Ostwald) 점도계를 사용하여 물과의 상대적 점도를 측정하였다. 표면장력은 모세관에 매달린 액적의 이미지로부터 프로그램(ImageJ)을 사용하여 계산하였다.

실험 조건은 Table 3에 나타내었으며,  $Re = \rho V D / \mu$ 이다. 충돌각과 제트 직경은 일정하며, 액체와 제트 속도를 변경하였다. 액막의 특성은 벽과 충돌하는 제트의 운동량의 영향을 받기 때문에, 사용유체 간 비교를 위하여 제트 속도를 같게 하기보다는 충돌 운동량( $\dot{m}V$ )을 같게 하는 제트 속도를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

충돌벽 노즐의 지속 충돌 제트에 의해 형성되는 전형적인 액막을 Fig. 4에 나타내었다. 물과 글리세롤 수용액의 경우, 형성되는 액막의 차이가 크게 나타났다. 물의 경우(Fig. 4a)에는 나뭇잎 모양의 액막이 형성되며, 액막 가장자리의 두꺼운 림으로부터 액사(ligament)가

Table 3 Experimental conditions

Case	$\dot{m}V \times 10^{-2}$ (kg·m/s <sup>2</sup> )	Water		59% Glycerol		68% Glycerol	
		V (m/s)	Re	V (m/s)	Re	V (m/s)	Re
1	2.46	5	5,594	4.66	976	4.54	300
2	4.83	7	7,832	6.52	1,366	6.36	420
3	8.11	9.07	10,148	8.46	1,773	8.25	545
4	13.4	11.64	13,023	10.85	2,274	10.58	699
5	19.8	14.19	15,876	13.23	2,773	12.90	853

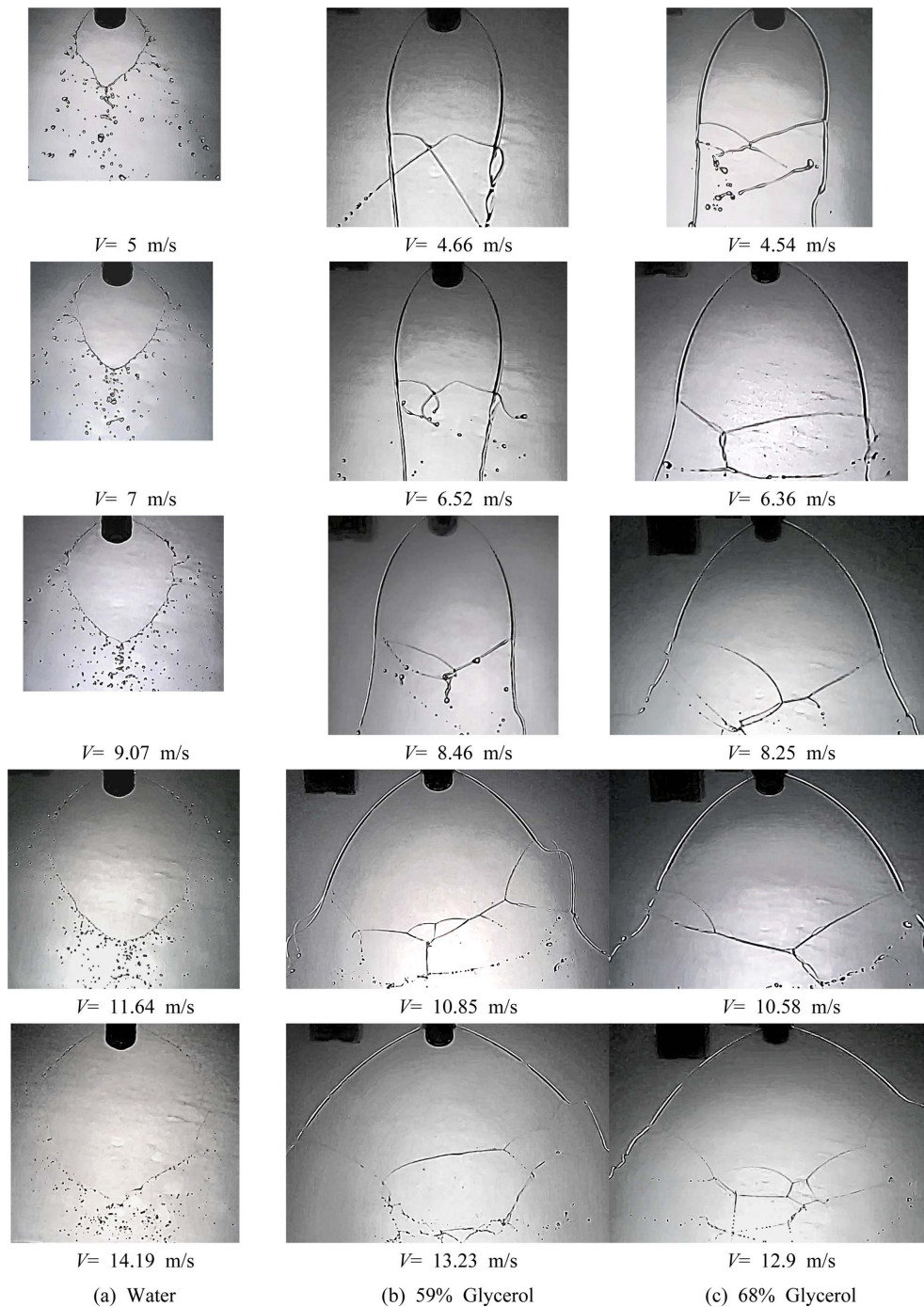


Fig. 4 Shape of liquid sheets for (a) water, (b) 59% Glycerol, (c) 68% Glycerol at different jet velocities

뿔어 나오고, 이 액사의 분열에 의해서 작은 액적들이 형성된다.

또한, 액막 표면에 충돌점으로부터 파생되는 파형과

같은 물질이 나타난다. 반면에 글리세롤 수용액의 경우 (Figs. 4b, 4c)에는 액막 가장자리에 두꺼운 림은 형성되지만, 림으로부터 분열되는 액사, 액적은 거의 없으며,

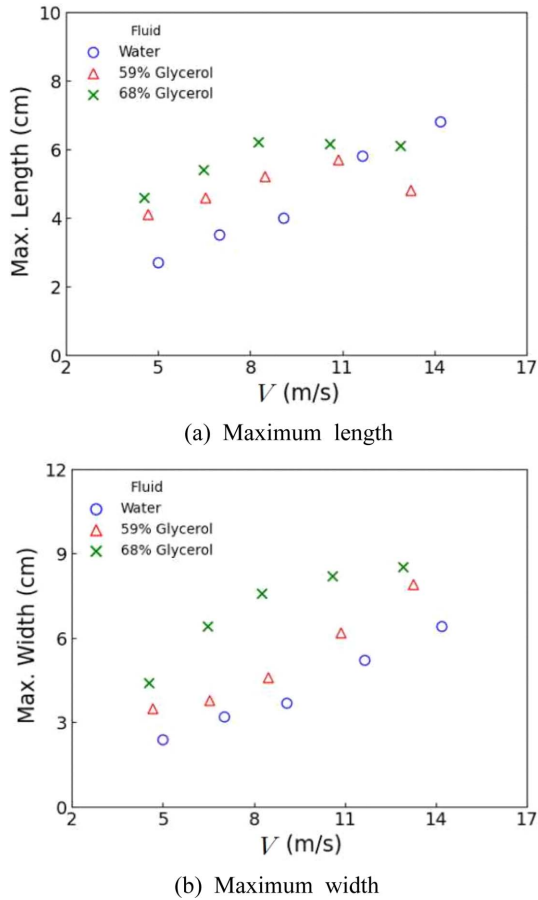


Fig. 5 Maximum length and width of liquid sheet for different fluids; (a) maximum length, (b) maximum width

액막 하부가 물의 경우처럼 모아지지 않고 분열되면서 액사, 액적이 형성되었다. 점도가 높을수록, 제트 속도가 높을수록 액막의 크기가 커지고, 액막 최하단부에서 액막 깨짐 현상이 나타났다. 또한, 액막의 표면이 비교적 매끄럽게 형성되었는데, 이는 글리세롤 수용액의 높은 점도로 인하여, 액막 표면에서 공기와의 속도 차이에 의해 생성될 수 있는 미세한 파동이 약화되기 때문으로 판단된다.

Figure 4의 액막에 대하여, 액막의 최대 길이와 폭을 Fig. 5에 나타내었다. 최대 길이는 충돌점에서 연결된 액막의 가장자리까지의 최대 길이이고 최대 폭은 액막의 수평 방향 최대 길이이다. 전반적으로 제트 속도가 증가할수록, 액체의 점도가 증가할수록 액막의 길이와 폭도 증가하였다. 점도가 가장 낮은 물의 경우, 제트 속

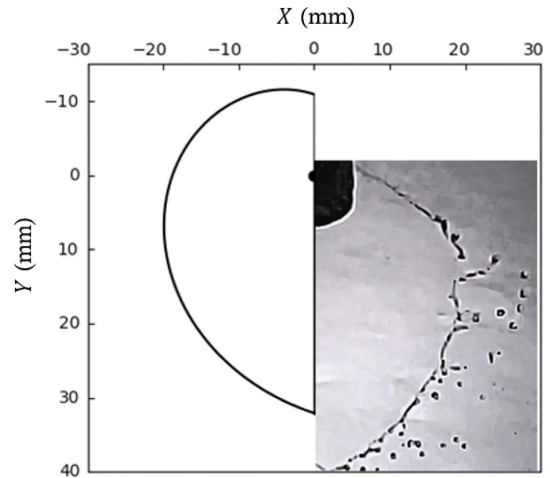


Fig. 6 Comparison of shape of liquid sheet between predictions and experiments for water,  $V=9.07$  m/s

도가 증가함에 따라 액막의 길이와 폭은 거의 선형적으로 증가하였다. 하지만 글리세롤 수용액의 경우, 제트 속도 증가에 따라 액막 하단부의 깨짐 현상으로 인하여 액막 길이는 증가 이후 감소한다. 59% 글리세롤 수용액의 액막 폭은 물의 경우와 같은 경향이지만 68% 글리세롤 수용액은 액막 폭이 최대값에 도달한 후 더 이상 증가하지 않았다.

Figure 6은 충돌벽 노즐에 의해 형성되는 액막의 모양(오른쪽)을 상호 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 이론적 모델링(Ibrahim과 Przekwas<sup>4)</sup>, 왼쪽)과 비교하였다. 이론적 모델링의 경우, 제트-제트 충돌이기 때문에 충돌점 상부 방향으로도 액막이 제한을 받지 않고 확장되어 나간다. 반면에 충돌벽 노즐은 노즐의 구조상 충돌점 상부로는 액막이 퍼져나가지 못하고 노즐 하부로만 액막이 형성된다. 이로 인하여 충돌벽 노즐의 액막이 상호 충돌 제트에 의한 액막보다 충돌점부터의 액막 길이가 더 긴 액막이 형성된다. 하지만 전체 액막 길이(약 30 mm)와 폭(약 20 mm)은 두 경우에 거의 비슷한 크기를 보여주고 있다.

Figure 7은 액체는 물이고 제트 속도  $V=9.07$  m/s일 때, 액막 두께의 공간 분포를 반지름과 원주각 변화에 따라 나타내고 있다. 반지름 변화에 따른 액막 두께는 모든 원주각에 대해서 충돌점으로부터의 반지름에 반비례하여 감소한다. 충돌점 주변( $r=0.6$  cm)에서 액막 두께가 가장 두꺼워 60~100  $\mu\text{m}$  정도이며, 반지름이 증가할수록 두께가 얇아져 액막 가장자리( $r=4$  cm)에서 20~30  $\mu\text{m}$  정도까지 얇아진다. 반지름이 작은 충돌점 주변에서는

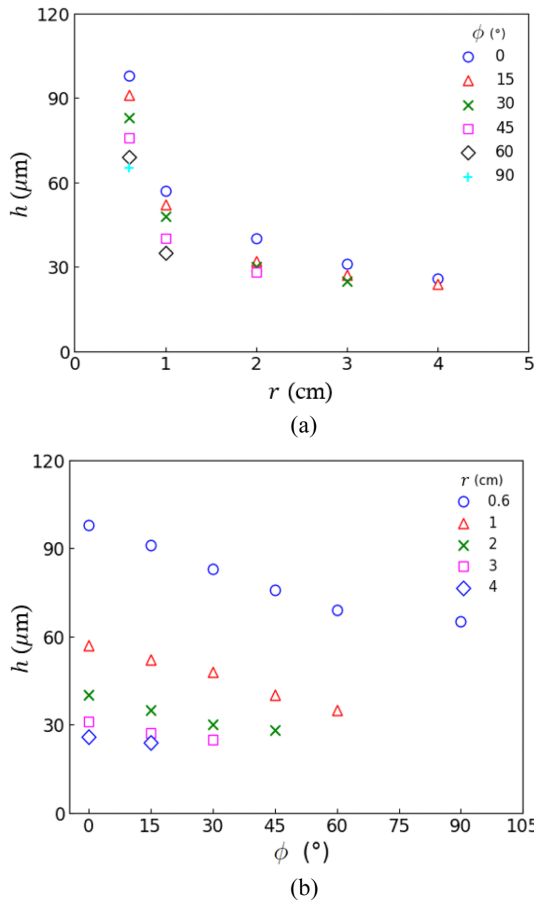


Fig. 7 Variation of sheet thickness for water,  $V=9.07$  m/s; (a) with change of radius, (b) with change of circumferential angle

원주각 변화에 따른 두께 변화가 크게 나타나지만, 반지름이 커질수록 원주각 변화에 따른 두께 변화는 감소한다. 원주각 변화에 따른 액막 두께(Fig. 7b)는 동일 반지름에서  $\phi=0^\circ$ 에서 가장 두껍고 원주각이 증가할수록 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

제트 속도가 액막 두께에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었으며, 액체는 물, 59% 글리세롤, 68% 글리세롤이며,  $\phi=0^\circ$ 이다. 전반적으로 모든 액체에서 제트 속도가 증가할수록 액막 두께도 증가한다. 이는 제트 속도가 증가함에 따라 유량이 증가하여 액막 두께가 두꺼워지기 때문이다. 충돌점 주변에서 제트 속도의 영향이 가장 크게 나타나며, 반지름이 커질수록 속도의 영향은 감소하기 시작하여 액막 가장자리에서는 속도와 무관하게 거의 동일해짐을 알 수 있다. 액체의 점도는 증가할수록

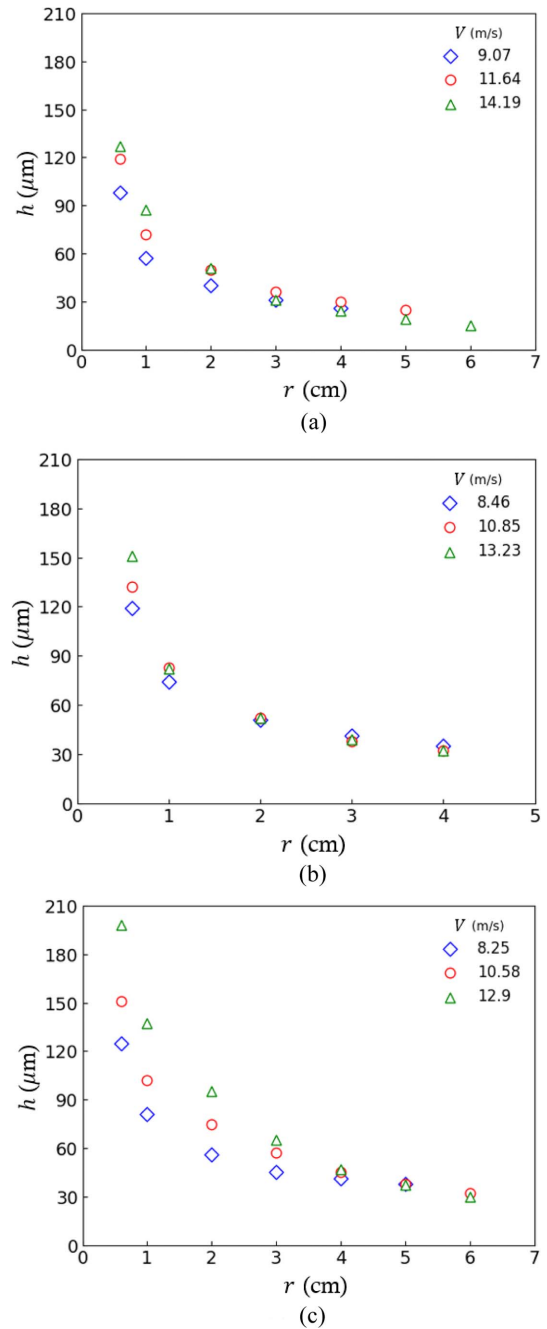


Fig. 8 Effect of jet velocities on sheet thickness with  $\phi=0^\circ$ ; (a) water, (b) 59% Glycerol, (c) 68% Glycerol

액막 두께가 더 두꺼워졌으며, 충돌점 주변에서 제트 속도의 영향이 점도가 가장높은 68% 글리세롤에서 가장 크게 나타났다.

Figure 9는 액체의 점도가 액막 두께에 미치는 영향과

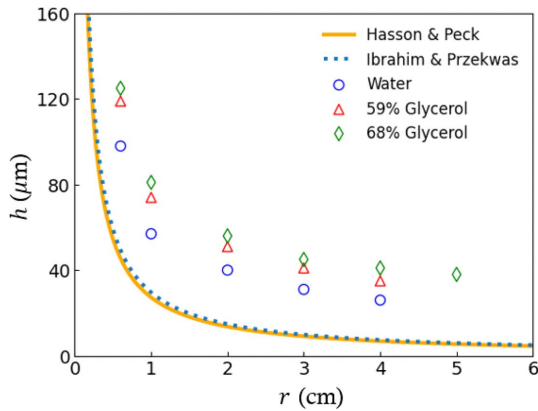


Fig. 9 Effect of liquid viscosity on sheet thickness and comparison between predictions and experiments for  $\phi=0^\circ$ ,  $V=9.07, 8.46, 8.25$  m/s for water, 59% glycerol, 68% glycerol, respectively

상호 충돌 제트의 이론적 두께 예측식과의 비교를 나타내고 있다. 이론적 두께 예측식으로 실선은 Hasson과 Peck<sup>(3)</sup>의 식 (1), 점선은 Ibrahim과 Przekwas<sup>(4)</sup>의 식 (2)를 나타낸다. 동일 운동량(Case 3)에서 액체의 점도는 물을 기준으로 59% 글리세롤(약 10 배), 68% 글리세롤(약 20배)로 높아지며  $\phi=0^\circ$ 이다. 측정된 액막 두께는 액체의 점도가 액막 두께에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있으며, 점도가 높아질수록 모든 위치에서 액막 두께가 더 두꺼웠다. 상호 충돌 제트에 의한 액막 두께에 대한 이론적 예측식(예: 식 (1), (2) 등)은 액막 두께가 액체의 물성치와 무관함을 보여준다. 하지만, 측정된 액막 두께는 모든 액체에서 두께 예측식들보다는 높은 값을 나타낸다. 즉, 상호 충돌 제트의 이론적 두께 예측식으로는 충돌벽 노즐의 액막 두께를 예측하는 것이 적절치 않음을 알 수 있다. 또한, 액체의 점도가 커질수록 그 차이가 더 커지기 때문에, 고점도 액체의 미립화에 주로 사용되는 충돌벽 노즐의 경우, 더욱 부적절함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 충돌벽 노즐의 저속 제트에 의해 형성되는 액막을 가시화하고 액막 두께를 직접접촉법으로 측정하였다. 액막 두께의 공간분포를 파악하고, 제트 속도와 액체 점성이 액막 두께에 미치는 영향을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 물의 경우 액막 표면에 파형이 나타나고 액막 가장자리에 불안정한 흐름의 림이 형성되며 림으로부터 다수의 액적이 분열된다. 반면, 글리세롤의 경우 매끄러운 액막 표면, 안정된 흐름의 림, 액막 하단부의 깨짐 현상과 이로부터 소수의 액적이 분열된다.

(2) 액막 두께는 충돌점 주변과 액막 중심축에서 가장 두꺼우며, 반지름에 반비례하여 감소하고, 원주각이 증가할수록 감소하였다.

(3) 제트 속도와 액체의 점도가 증가할수록 액막 두께는 증가하였으며, 충돌점 주변에서 차이가 크고 액막 가장자리로 갈수록 차이는 감소하였다.

(4) 상호 충돌 제트의 이론적 두께 예측식은 제트 속도, 액체의 물성치가 반영되지 않으며, 실제 충돌벽 노즐의 액막 두께보다 낮은 값을 예측하였다.

#### 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. Poulidakos, "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, "저속 충돌 제트로 생성되는 액막의 두께 분포 특성 연구", *한국분무공학회지*, 26권 1호, 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.