

## 저속 충돌 제트로 생성되는 액막의 두께 분포 특성 연구

한명준\* · 전영우\* · 서태원\* · 강보선†

### A Study of the Characteristics of Thickness Distribution of Liquid Sheet Formed by Two Low Speed Impinging Jets

M. J. Han, Y. U. Jeon, T. W. Seo and B. S. Kang

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

#### Abstract

In this study, the thickness of the liquid sheet formed by two low speed impinging jets was measured by the direct contact method. The effects of jet velocity and liquid viscosity on the thickness were analyzed and the results were compared with theoretical modeling and optical thickness measurement results. The liquid film thickness decreased as the radius and circumferential angle increased. The jet velocity did not affect the liquid film thickness as predicted in theoretical modeling. In the theoretical modeling, there was no influence of the fluid properties on thickness, but in the case of low viscosity liquids, the thickness was predicted high, and it was well matched in high viscosity liquids. The direct measurement results showed no significant difference from the optical measurement results, thus confirming the reliability of the optical measurement method.

#### 1. 서 론

직경  $D$ , 속도  $V$ 인 두 제트가 Fig. 1에 나타낸 것처럼 충돌각  $2\theta$ 로 서로 충돌하면, 각 제트의 속도가 낮을 경우는 두 제트를 포함하는 평면에 직각인 평면에 나뭇잎 모양의 액막이 형성된다. 이렇게 형성되는 액막의 분열을 통하여 액체를 미립화시키는 방법은 충돌 제트 인젝터(impinging jet injector)에서 많이 활용되고 있다. 충돌 제트 인젝터는 제트 속도가 액체의 미립화를 위해 충분할 정도의 고속으로 서로 충돌하면서, 그 충돌의 힘에 의하여 액체를 미립화시키는 인젝터이다. 제트의 속도가 증가하면, 액막은 하단부터 분열을 시작하여 액막이

형성되었던 같은 평면에 선형 분무(fan spray)가 형성된다. 이 인젝터는 가공 및 제작이 단순하면서도, 분사 연료의 미립화 및 혼합 특성의 우수성으로 인하여, 액체 연료를 사용하는 로켓 엔진에서 많이 이용되고 있다.

충돌 제트로 생성되는 액막의 분열을 이용하는 인젝터의 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 신뢰할만한 실험적 연구 결과가 필요하다.

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> 등에 의해 수행되었으며, Ibrahim과 Przekwas<sup>(4)</sup>, Li와 Ashgriz<sup>(5)</sup> 등은 액막의 두께 및 형상을 예측할 수 있는 이론적 모델링을 수행하였고, Inamura와 Shirota<sup>(6)</sup>는 충돌 전 제트의 속도 분포가 액막 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 액막 두

(Received: 11 Jan 2021, Received in revised form: 28 Jan 2021, Accepted: 29 Jan 2021)

\*전남대학교 기계공학부

†책임저자, 전남대학교 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

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

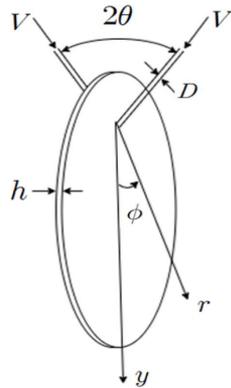


Fig. 1 Schematic of liquid sheet formed by two impinging jets at low jet velocities

계에 관한 실험적인 연구로써, Taylor<sup>(7)</sup>는 먼도날로 상자를 만들어, 일정 시간 액체를 수집한 다음, 액막 속도를 제트 속도와 같다고 가정하고, 두께를 간접적으로 측정하였다. 이 방법은 단순하지만, 액막 유동이 영향을 받고, 액막 전 지역의 두께를 알 수 없는 문제점이 있었다. Shen과 Poulikakos<sup>(8)</sup>는 홀로그래피 간섭기법을 이용하여 액막의 두께 분포를 측정하였으며, 기존 연구자들의 이론적인 예측과 차이가 있음을 확인하였고, 그 이유를 이론적인 해석에서는 고려하지 못한 중력의 영향이라는 결론을 내렸다. Choo와 Kang<sup>(9)</sup>은 Dombrowski 등<sup>(10)</sup>이 팬 분무노즐에 의해 형성되는 액막 두께를 측정하기 위해 이용한 간섭법(interferometry)을 이용하여, 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 두께 분포를 여러 변수들에 대해서 측정하였으며, 액체가 물인 경우, 기존 두께 예측식들이 실험 측정값보다 액막 두께를 크게 예측하는 것으로 결론지었다.

본 연구에서는 상호 충돌하는 저속 제트에 의해 형성되는 액막의 두께를, 이전 연구에서 사용한 광학적인 방법이 아닌 직접접촉법에 의하여 측정하여, 액막의 위치별 두께 분포 특성을 파악하였다. 특히, 이론적인 모델링에서는 고려하지 않았던 제트 속도와 유체의 점성이 액막 두께에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 측정 결과를 기존의 이론적인 모델링과 간섭 효과를 이용한 광학적 두께 측정 결과와 비교하였다. 광학적 방법은 액막 유동을 방해하지 않으며, 액막 전체의 두께를 예측할 수 있는 장점이 있지만, 원주각마다 프린지 간격 해석을 해야 하는 단점이 있다. 직접접촉법은 액막 두께를 가장 정확하게 측정할 수 있는 방법이지만, 액막 전체 두께를 측정하기 위해서는 접촉점을 무수히 이동시켜야 하는

단점이 있다.

## 2. 두께 예측 이론적 모델링

액막 임의의 단면에서의 질량 보존을 고려하면, 임의 위치에서의 액막 두께  $h$ 는 충돌점으로부터의 반지름  $r$ 에 반비례함을 알 수 있다. 즉,

$$h = \frac{K}{r} \tag{1}$$

로 표시되며, 비례 상수  $K$ 를 액막 두께 상수로 정의한다.

이론적으로 예측되는 액막 두께에 관한 기존의 모델들은 다음과 같다. Ranz<sup>(1)</sup>는 액막 속도가 제트 속도와 같다는 가정과 질량, 운동량이 액막에서 보존됨을 이용하여, 액막 두께를 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{hr}{R^2} = (1 + 2\cos\theta\cos\phi) \tag{2}$$

여기서,  $R$ 은 제트의 반지름,  $\phi$ 는 원주각이다. 이 식은 충돌각  $\theta$ 가  $60^\circ$ 보다 작으면  $\phi$ 가  $180^\circ$ 에서 음의 두께가 생기는 문제점이 있다. Miller<sup>(2)</sup>는 액막 내의 유동이  $\phi = 0 \sim 2\pi$ 에서 대칭이라는 조건을 추가하여, Ranz의 두께 예측식의 문제점을 보완한 다음과 같은 식을 제안하고 실험 결과와 비교하였다.

$$\frac{hr}{R^2} = \left( \frac{1 - \cos^2\theta}{1 + \cos^2\theta} \right) \left( \frac{1}{1 - \frac{2\cos\theta\cos\phi}{1 + \cos^2\theta}} \right) \tag{3}$$

위 두 식은 충돌각이  $60^\circ$  이상에서만 어느 정도의 정확도를 가지고 있다. Hasson과 Peck<sup>(3)</sup>은 액막과 평행한 액주의 단면을 액막의 형상으로 간주하여 다음과 같은 식을 구하였다.

$$\frac{hr}{R^2} = \frac{\sin^3\theta}{(1 - \cos\phi\cos\theta)^2} \tag{4}$$

Ibrahim과 Przekwas<sup>(4)</sup>는 Naber와 Reitz<sup>(11)</sup>가 엔진 벽면에 충돌하는 분무에 관한 연구에서 가설했던 초기 두께를 이용하여 다음과 같은 액막 두께에 관한 식을 제안하였다.

$$h = h_0 \frac{(R/\sin\theta)}{r} \tag{5}$$

여기서 초기 두께  $h_0$ 는

$$h_0 = [\gamma R \sin \theta / (e^\gamma - 1)] e^{\gamma(1 - \phi/\pi)} \quad (6)$$

이며,  $\gamma$ 는 다음 식에서 구해진다.

$$\cos \theta = \left( \frac{e^\gamma + 1}{e^\gamma - 1} \right) \frac{1}{1 + (\pi/\gamma)^2} \quad (7)$$

위에서 제시된 이론적 액막 두께 예측식들은 액막 두께가 제트 직경, 층돌각, 원주각만의 함수이며, 제트 속도, 액체의 물성치와는 무관함을 보여 주고 있다.

### 3. 실험 장치

본 연구의 실험 장치는 Fig. 2에 나타낸 것처럼, 액막을 형성하는 층돌 제트 시스템, 액막 형상을 가시화하는 광학시스템, 액막 두께를 측정하는 시스템으로 구성되어 있다. 액체는 물과 글리세린 수용액을 사용하였고, 안정된 액체의 공급을 위하여, 고압 질소에 의하여 가압되는 액체 저장용기로부터 액체가 유량계와 유량조절밸브, 압력계를 거쳐 제트가 나오는 유리관으로 공급된다. 안정된 층류 액체 제트를 형성하기 위하여, 표면거칠기 영향을 최소화한, 정밀가공된 유리관을 사용하였다. 유리관의 내경은 1.016 mm이며, 충분히 발달된 제트를 형성하기 위하여 길이를 직경에 비해 상대적으로 긴 15.24 cm로 하였다.

액막 형상의 가시화는 액막 후방에 놓인 Strobe-

scope(V-tek, DX525A)를 광원으로 하여 CCD 카메라(Redlake MegaPlusII, ES4020)를 이용하여 액막 이미지를 획득하였다. 밝고 균일한 배경을 만들기 위하여, 광원 앞에 산란판(diffuser)을 설치하였다. 액막 두께 측정 은 바늘을 액막 표면에 접촉하는 순간까지 3축 이송장치(PI, M521, 분해능 = 33 nm/count)로 정밀하게 이송시켜서 그 위치로부터 두께를 계산하였다. 바늘이 액막에 접촉하기 직전까지는 액막 표면에 아무런 흔적이 나타나지 않지만, 1 count를 이동시켜서 액막에 접촉하면, 바늘이 액막 유동을 방해하기 때문에 액막 표면에 접촉 흔적이 나타난다.

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 안 값은 물과의 상대적 값을 나타낸다. 유체의

Table 1 Physical properties of liquids

Liquid	Water	50% G	59% G	68% G
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1001 (1.00)	1141.1 (1.14)	1151.2 (1.15)	1211.2 (1.21)
Viscosity (N s/m <sup>2</sup> )	1.002 (1.00)	6.15 (6.14)	9.97 (9.95)	20.51 (20.47)
Surface Tension × 10 <sup>3</sup> (N/m)	72.09 (1.00)	68.48 (0.95)	66.30 (0.92)	65.60 (0.91)

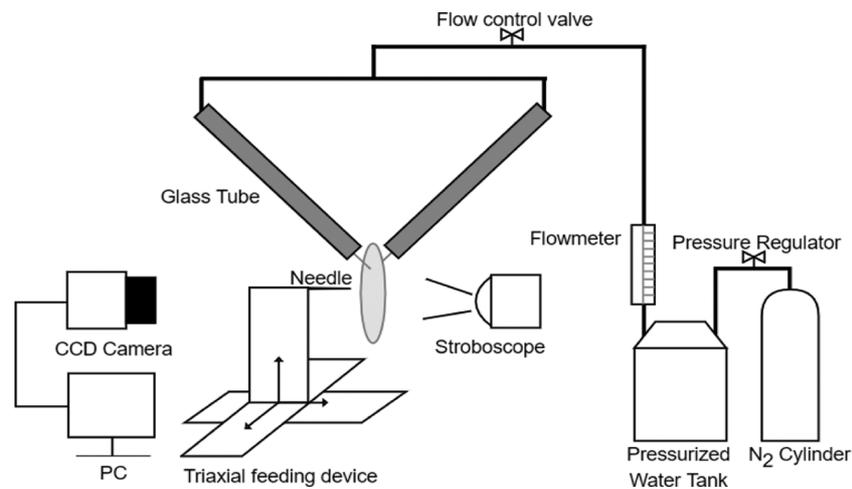


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Test conditions

Liquid	$D(\text{mm})$	$2\theta(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$V(\text{m/s})$
Water	1.0	120	0, 30, 60, 90	2.58, 3.22, 3.85, 4.48
50% Glycerol			0	3.22
59% Glycerol				
68% Glycerol				

점도는 글리세린의 중량비를 50%, 59%, 68%로 하였을 때, 물의 점도를 기준으로 하여 약 6, 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 2에 나타내었다. 두 제트의 충돌점을 원점으로 설정하고, 물의 경우에는 원주각  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ 에서 반지름 방향으로 두께 변화가 심한 2.5 cm까지는 0.5 cm, 그 이후부터는 1 cm 간격으로 총 20 지점에서, 글리세린 수용액의 경우에는  $\phi = 0^{\circ}$ 에서 0.5 cm 간격으로 총 8 지점에서 두께를 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Figure 3은 충돌 제트에 의해 형성되는 전형적인 액막을 보여주고 있다. 액체는 물이고 제트 속도  $V=4.48\text{ m/s}$ 이다. 충돌점으로부터 형성되는 얇은 안정된 액막의 가



Fig. 3 Typical liquid sheet and droplets

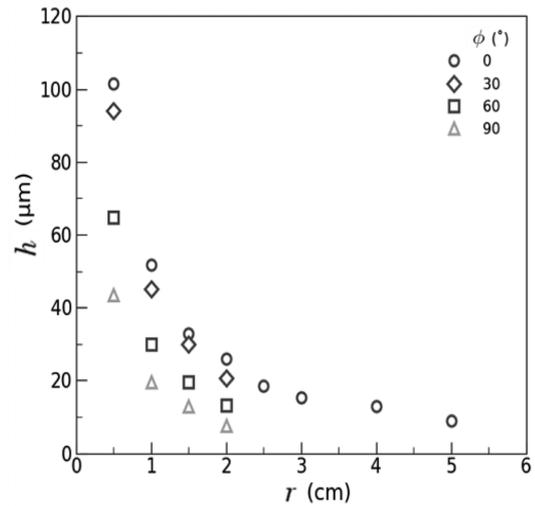


Fig. 4 Variation of sheet thickness with radius

장자리에는 모여든 액체에 의해 상당한 직경의 실린더 형태의 띠가 형성된다. 이 띠의 표면에서 돌기가 액주 형태로 생성되고, 이 돌기의 끝 부분에서 액적이 분리되거나 돌기의 중간 부분이 끊어지면서 다수의 액적이 액막 주변에 생성된다.

Figure 4는 원주각  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ 에서 충돌점으로부터의 반지름 위치에 따른 액막 두께를 나타내고 있다. 액체는 물이고 제트 속도  $V=4.48\text{ m/s}$ 이다. 식 (1)에 나타난 것과 같이, 액막 두께  $h$ 는 충돌점으로부터의 반지름  $r$ 에 반비례하여 감소함을 모든 원주각에 대해서 확인할 수 있다. 충돌점 주변에서는 액막 두께가 두꺼워 40~100  $\mu\text{m}$  정도이지만, 충돌점에서 멀어질수록 두께가 얇아지며, 액막 가장자리에서는 10~20  $\mu\text{m}$  정도까지 얇아지게 된다. 또한, 모든 동일 반지름 위치에서는 원주각이 작을수록 두께가 더 두껍게 나타난다.

원주각 변화에 따른 액막 두께의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 액체는 물이고 제트 속도  $V=4.48\text{ m/s}$ 이다.

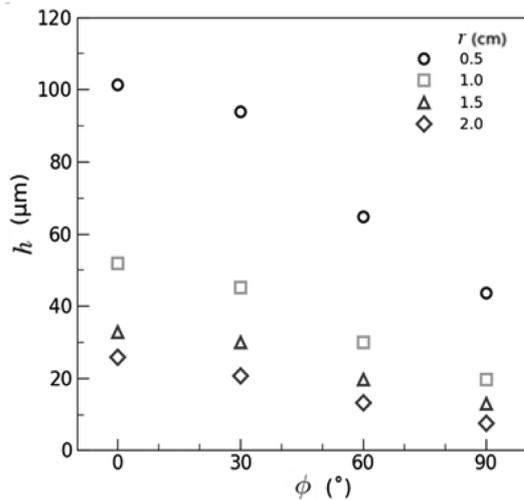


Fig. 5 Variation of sheet thickness with circumferential angle

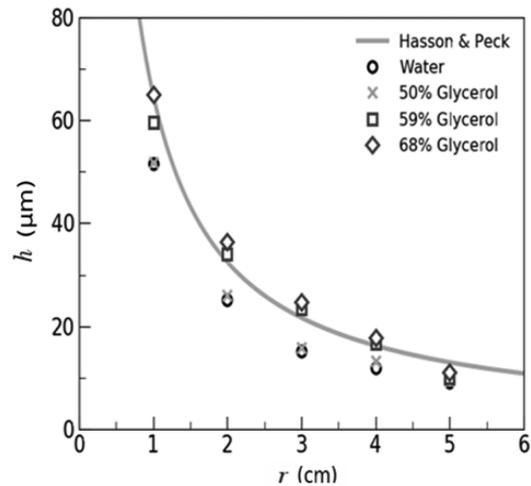


Fig. 7 Effect of liquid viscosity on sheet thickness

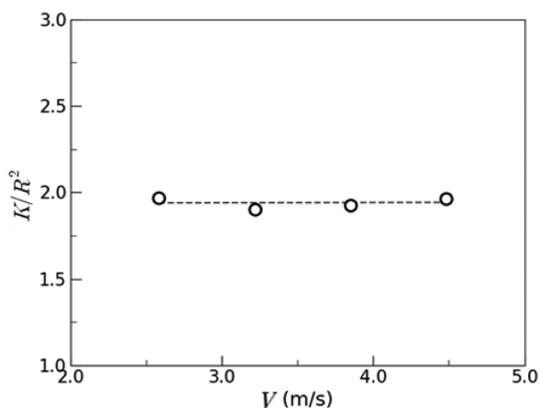


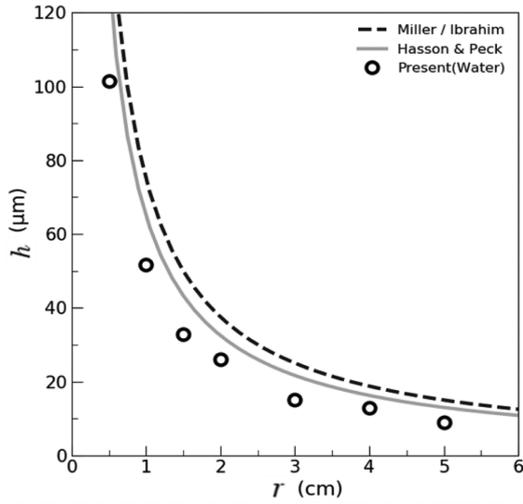
Fig. 6 Variation of dimensionless constant of sheet thickness with jet speed

동일 반지름에서 액막 두께는 원주각이 증가할수록 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 감소의 기울기는 반지름이 작을수록 크게 나타난다. 즉, 충돌점 주변, 반지름이 작은 경우는 원주각에 따라 두께 변화가 크게 나타나지만, 반지름이 큰 경우는 두께 변화가 그리 크지 않았다. 또한, 동일 원주각에서 반지름 변화에 따른 두께의 변화는, 원주각이 작은 경우가 가장 크고, 원주각이 커질수록 두께 변화가 감소하였다.

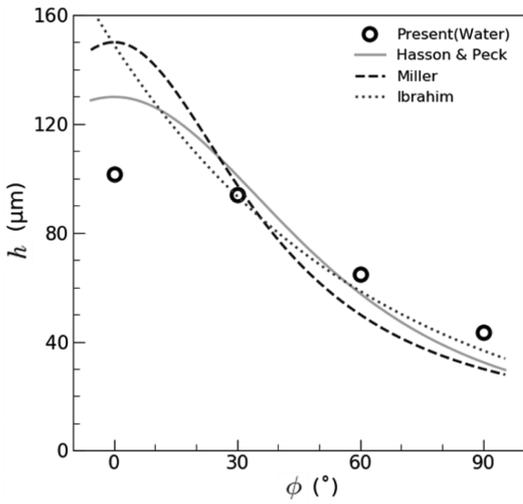
Figure 6은 제트 속도의 변화가 액막 두께에 미치는 영향을 나타내고 있다. 액체는 물이며, 액막 두께는 식 (1)에 나타난 액막 두께 상수  $K$ 를 무차원화시킨 변수  $K/R^2$

$R^2$ 으로 표시하였다. 모든 두께 예측 이론식들은 충돌 전 제트 속도가 형성되는 액막 두께에 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다. 제트 속도가 2.58 m/s부터 4.48 m/s까지 증가하였지만, 무차원 액막 두께 상수의 변화는 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 이는 제트 속도의 증가에 의하여 유량은 증가하면서 액막의 크기는 증가하지만, 동일 반지름 위치에서의 두께는 변화가 없다는 것을 나타낸다.

기존의 두께 예측 이론적 모델링에서는 유체의 물성치 변화가 액막 두께에 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다. 이를 확인하기 위하여, 유체의 물성치 중에서 두께에 가장 영향을 미칠 것으로 예측되는 점도의 영향을 분석하였다. Fig. 7은 액체의 점도 변화가 액막 두께에 미치는 영향을 나타내고 있다. 액체는 물과 글리세롤 수용액이며 제트 속도  $V=3.22$  m/s이다. 심볼은 측정값이고 실선은 두께 예측 이론식 중에서 가장 실험값과 근사한 Hasson과 Peck<sup>(3)</sup>의 이론식을 나타낸다. 액막 두께는 액체의 점도 변화에 따라 확실하게 변화함을 알 수 있다. 물보다 점도가 약 6 배 높은 50% 글리세롤 수용액까지는 액막 두께가 물인 경우와 큰 차이가 없다. 하지만 점도가 약 10 배 높은 59% 글리세롤 수용액은 물보다 훨씬 두꺼운 액막이 형성되었다. 점도가 약 20 배 높은 68% 글리세롤 수용액의 액막 두께는 충돌점 주변에서는 가장 두껍지만 반지름이 커지면서 59% 글리세롤 수용액과 거의 비슷해짐을 알 수 있다. Hasson과 Peck<sup>(3)</sup>의 이론식은 액체가 점도가 낮은 물인 경우는 실



(a)



(b)

Fig. 8 Comparison with theoretical predictions; (a) radial direction, (b) circumferential direction

험값과 많은 차이가 있지만, 오히려 점도가 높은 액체인 경우에는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Figure 8은 Miller<sup>(2)</sup>, Ibrahim과 Przekwas<sup>(4)</sup>, Hasson과 Peck<sup>(3)</sup>의 두께 예측 이론식과 액체가 물인 경우의 실험값을 비교하여 나타내고 있다. 점선은 Miller와 Ibrahim과 Przekwas, 실선은 Hasson과 Peck의 이론적 모델이며 심볼은 액체는 물, 제트 속도  $V=4.48$  m/s인 경우이다. 원주각  $\phi=0^\circ$ 인 경우, 반지름에 따른 액막 두께 변화를 나타낸 Fig. 8(a)에서 이론식들은 실험값과 마찬가지로

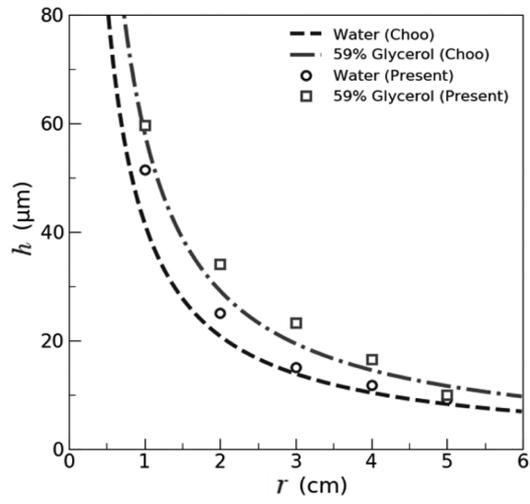


Fig. 9 Comparison between optical and direct contact measurement results.

액막 두께가 반지름에 반비례하여 감소함을 보여주고 있다. 하지만, 이론식들은 물의 두께 측정값보다 액막 두께를 높게 예측하였으며, 물의 두께 측정값과 가장 차이가 적은 이론식은 Hasson과 Peck의 모델임을 알 수 있다.

Figure 8(b)는 두께가 두꺼운 충돌점 주변인  $r=0.5$  cm인 경우, 원주 방향으로 액막 두께 변화를 나타내고 있다. 이론식들은 원주각의 증가에 따라 액막 두께가 감소하는 실험값과 동일한 경향을 잘 보여주고 있다. 하지만, 원주각  $\phi$ 가 작은 경우에는 이론식과 실험값의 차이가 매우 크며, 액막 두께를 실험값보다 훨씬 두껍게 예측하고 있다. 반면에,  $\phi$ 가 큰 경우에는 실험값과의 차이가 아주 크지는 않지만, 실험값보다 얇게 예측함을 알 수 있다.

빛의 간섭 현상을 이용하여 액막 두께를 측정된 Choo와 Kang<sup>(9)</sup>은 프린지를 분석하여 식 (1)의 두께 상수  $K$ 를 구하였다. Fig. 9는 본 연구의 두께 측정값과 Choo와 Kang<sup>(9)</sup>의 광학적 측정 결과를 비교하여 나타내고 있다. 액체는 물과 59% 글리세롤 수용액이며 제트 속도  $V=3.22$  m/s, 원주각  $\phi=0^\circ$ 이다. 점선은 Choo와 Kang<sup>(9)</sup>이 구한 두께 상수  $K$ 를 이용한 두께 식을 나타내고, 심볼은 본 연구의 측정값이다. 전반적으로 광학적 두께 측정결과와 직접접촉법 결과가 어느 정도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 물의 경우는 액막 두께가 두꺼운 충돌점 주변에서는 약간 낮게 나타나지만, 충돌점에서 멀어져 두께가 얇아질수록 잘 일치하고 있다. 점도가 높은 글리

Table 3 Comparison between optical and direct contact measurement results

	$K/R^2$		Thickness Difference ( $\mu\text{m}$ )
	Direct Measurement	Optical Measurement	
Water	1.93	1.67	3.52
59% Glycerol	2.51	2.34	2.07

세롤 수용액의 경우는 충돌점 주변에서도 물의 경우보다 잘 일치하고 있다.

Table 3은 두 측정 방법의 결과를 정량적으로 비교하여 보여주고 있다. 무차원 액막 두께 상수  $K/R^2$ 에서, 광학적 방법은 프린지 해석으로 구해진 액막 두께 상수  $K$ , 직접접촉 측정 방법은 평균 두께 상수  $K$ 를 사용하였으며, 두께 차이는 평균값이다. Fig. 9에서 확인할 수 있었듯이, 직접 접촉 측정 방법의 무차원 액막 두께 상수가 광학적 방법보다 크며, 두 방법의 두께 차이는 글리세롤 수용액의 경우가 작음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 두께를 직접접촉법에 의하여 측정하였다. 제트 속도와 액체 점성이 두께에 미치는 영향을 분석하였으며, 이론적 모델링과 광학적 두께 측정 결과와 비교하였다. 액막 두께는 반지름에 반비례하여 감소하고, 원주각이 증가할수록 감소하였다. 제트 속도는 이론적 모델링에서 예측하였듯이 액막 두께에 영향을 미치지 않았다. 이론적 모델링에서는 유체 물성치의 영향이 없었지만, 점도가 낮은 물의 경우는 두께를 높게 예측하였고, 점도가 높은 액체에서는 잘 일치하였다. 광학적 측정 결과는 직접접촉 측정 결과와 큰 차이를 보이지 않아 광학적 두께 측정 방법의 신뢰성을 확인하였다.

#### 참고문헌

(1) W. E. Ranz, "Some experiments on the dynamics of liq-

uid 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. 2981~987.

(5) R. Li and N. Ashgriz, "Characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets", Phys. Fluids, Vol. 18, 2006, 087104.

(6) T. Inamura and M. Shirota, "Effect of velocity profile of impinging jets on sheet characteristics formed by impingement of two round liquid jets", Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 60, 2014, pp. 149~160.

(7) F. R. S. Taylor, "Formation of thin flat sheets of water", Proc. Roy. Soc. of London, Vol. 259, 1960, pp. 1~17.

(8) 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.

(9) 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.

(10) N. Dombrowski, D. Hasson, and D. E. Ward, "Some aspects of liquid flow through fan spray nozzles", Chemical Engineering Science, Vol. 12, 1960, pp. 35~50.

(11) J. D. Naber and R. D. Reitz, "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", 1988, SAE 880107.