

충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 두께 특성에 관한 연구

추연준* · 강보선**
(1999년 6월 14일 접수)

Interferometric Measurements of the Thickness Distribution of the Liquid Sheet Formed by Two Impinging Jets

Yeon-Jun Choo and Bo-Seon Kang

Key Words: Impinging-Jet Injector(충돌제트 인젝터), Liquid Sheet(액막), Liquid Sheet Thickness(액막 두께), Interference(간섭)

Abstract

In this research, a study on the characteristics of the liquid sheet formed by two impinging jets is presented. Using the interference phenomena of light, the thickness of the liquid sheet, which seems to heavily affect the size of the droplets, is measured and compared with existing theoretical modelings. Thinner liquid sheet is produced with larger impinging angle, smaller orifice diameter, and higher azimuthal angle but the jet velocity doesn't affect the thickness. More viscous liquid produces thicker liquid sheet. The theoretical modelings predict the same trend as the experiments but the thickness values are overestimated at low azimuthal angles. This difference is gradually decreased as the azimuthal angle is increased. The breakup mechanism of the droplets from the liquid sheet is visualized by a high speed camera. The crest around the edge of the liquid sheet is protruded with the accumulation of liquid at the end of protuberance, which contracts into a spherical shape and then becomes detached when the stem breaks down, producing large droplets with a few small size of satellites.

1. 서론

액체 연료를 사용하는 로켓 엔진의 여러 구성 요소 중 인젝터에는 크게 샤워 헤드형(shower head injector)과 유동 충돌형(impinging-streams injector)이 있으며, 가공, 제작의 단순성, 분사 연료의 미립화 및 혼합 특성의 우수성으로 인하여, 유동 충돌형의 일종인 충돌제트 인젝터(impinging-jet injector)가 많이 이용되고 있다.⁽¹⁾ 충돌제트 인젝터는 고속의 두 개의 제트가 서로 충돌하면서, 그 충돌의 힘에 의하여 액체를 미립화시키는 인젝터로서, 두 제트의 속도 V 가 낮을 경우는 나뭇잎 모양의 액막이 형성되고(Fig. 2(a)), 각 제트의 속도가 액체의 미립화를 위해 충분할 정도로 증

가되면, 액막은 하단부터 분열을 시작하여 액막이 형성되었던 같은 평면에 선형 분무(fan spray)가 형성된다. 따라서, 충돌제트 인젝터의 분무 특성을 파악하기 위해서는 저속 제트에 의해 형성되는 액막의 특성에 대한 연구가 필수적이며, 특히 액막 두께에 관한 정보는 액막의 미립화로 형성되는 액적 크기를 결정하는데 가장 기본적인 자료로서 이용되는 만큼 이에 대한 신뢰할만한 실험적 연구 결과가 필요하다.

저속 제트에 의해 형성되는 액막의 특성과 관련된 지금까지의 연구 중 실험적인 연구로써는, 액막의 두께 및 형상에 대한 연구,^(2,3) 액막의 형상 및 액적 크기 측정에 관한 연구⁽⁴⁾ 등이 수행되었다. 이론적인 해석으로는 액막의 두께에 대한 모델,⁽⁵⁻⁸⁾ 액막의 형상에 대한 모델,^(4,8) 액막 주위로 부서지는 액적 크기에 대한 모델⁽⁹⁾ 등에 관한 연구가 있다.

특히 액막 두께에 관한 이론적인 모델링은

* 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 전남대학교 자동차공학부
E-mail : bskang@chonnam.ac.kr
TEL : (062)530-1683 FAX : (062)530-1689

Ranz,⁽⁵⁾ Miller,⁽⁶⁾ Hasson과 Peck,⁽⁷⁾ Ibrahim과 Przekwas⁽⁸⁾ 등에 의해 수행되었지만, 이론적 예측과 비교할만한 실험적 연구는 많지 않다. 실험을 통해 두께 측정을 한 Taylor⁽²⁾는 날카로운 면도날로 사각 상자를 만들어, 일정 시간 동안에 상자에 모아진 액체의 체적을 측정하고, 액막의 속도를 제트의 속도와 같다고 가정하고, 액막의 두께를 간접적으로 측정하였다. 이 방법은 단순하기는 하지만, 액막 유동이 영향을 받게 되고, 액막 전 지역의 두께를 알 수 없는 문제점이 있었다. Shen⁽³⁾은 홀로그래피 간섭법을 이용하여 액막 두께를 측정하고 이론식과 실험 결과를 비교하였다. Dombrowski 등⁽¹⁰⁾은 충돌하는 두 제트에 의해 형성되는 액막은 아니지만, 선형 분무 노즐에 의해 형성되는 액막의 두께를 빛의 간섭 현상을 이용하여 실험적으로 측정하였다.

본 연구에서는 Dombrowski 등⁽¹⁰⁾이 이용한 빛의 간섭 현상을 이용하여 두 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 두께를 실험적으로 측정하여, 두께 특성을 파악하고, 기존의 이론적인 모델링과 비교하였다. 특히, 이론적인 모델링에서는 고려하지 않았던 유체의 점성이 액막 두께에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 고속촬영카메라를 이용하여 액막 가장자리에서의 액적 분열 과정을 기록하여, 액적 분열 메커니즘에 관한 해석을 시도하였다.

이론적으로 예측되는 액막 두께에 관한 기존의 모델들은 다음과 같다. 액막 임의의 단면에서의 질량 보존을 고려하면, 임의 위치에서의 액막 두께 h 는 충돌점으로부터의 반지름 r 에 반비례함을 알 수 있다. 즉,

$$h = \frac{K}{r} \quad (1)$$

로 표시되며, 비례 상수 K 를 액막 두께 상수로 정의한다.

Ranz⁽⁵⁾는 질량, 운동량 보존을 이용, 액막 임의 위치에서의 두께를 다음과 같이 표현하였다.

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

여기서, R 은 오리피스의 반지름, θ 는 두 제트 사이 충돌각의 1/2, ϕ 는 원주각이다(Fig. 2(a) 참

조). 이 식은 θ 가 60°보다 작으면 ϕ 가 180°에서 음의 두께가 생기는 문제점이 있다.

Miller⁽⁶⁾는 이를 보완한 다음과 같은 식을 제안하였다.

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

위 두 식은 충돌각이 60° 이상에서만 어느 정도의 정확도를 가지고 있다. Hasson과 Peck⁽⁷⁾은 액막과 평행한 액주의 단면을 액막의 형상으로 간주하여 수학적 모델링을 통해 다음과 같은 식을 구하였다.

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

Ibrahim과 Przekwas⁽⁸⁾는 Naber와 Reitz가 엔진 벽면에 충돌하는 분무에 관한 연구에서 가설했던 초기 두께를 이용하여 다음과 같은 액막 두께에 관한 식을 제안하였다.

$$h = \frac{(Rh_0 / \sin \theta)}{r} \quad (5)$$

여기서 초기 두께 h_0 는

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

이며, γ 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 예측식들은 액막 두께가 오리피스의 직경, 충돌각, 원주각만의 함수이며 제트 속도와는 무관하며 또한 액체의 물성치 특성은 전혀 고려되지 않았음을 보여 주고 있다.

2 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 Fig. 1에 나타낸 것처럼, 액막을 생성하는 충돌 제트 시스템, 간섭 무늬를 형성하는 광학적 시스템 및 간섭 무늬를 분석, 처리하여 액막 두께를 산출하는 이미지 처리 시

스텝으로 구성되어 있다.

안정된 액체의 공급을 위하여, 고압 질소에 의하여 가압되는 저장용기로부터 액체가 유량계와 미세유량조절밸브, 압력계를 거쳐 오리피스로 공급된다. 오리피스는 정밀 가공된 유리로써, 내경 D 는 0.508, 0.8, 1.016 mm이며, 충분히 발달된 제트를 형성하기 위하여 길이를 직경에 비해 상대적으로 긴 15.24 cm로 하였다. 광원은 초고압 수은램프(Ushio, HB-101A)이며 램프 출구에 볼록 렌즈를 장착하여 직경 3.6 cm 내외의 빛을 형성한 후, 간섭 현상이 나타날 수 있도록 중심 파장이 577 nm인 간섭필터(interference filter)를 이용하여 단색광(monochromatic light)이 되도록 하였다. 액막의 전면과 후면에서 반사된 빛에 의해 형성된 간섭무늬는 CCD 카메라(Pulnix, TM-9701)를 이용해서 얻고, 이미지 해석 프로그램(Metrox, Inspector)을 이용하여, 간섭 무늬의 개수, 총돌점으로부터의 거리 등을 측정하였다.

또한, 액막 주변의 생성 액적들이 어떠한 과정을 거쳐서 액막으로부터 분열되는지를 살펴보기 위하여 고속촬영카메라(NAC, E-10)를 이용하여 액막을 촬영하였다. 촬영 속도는 초당 6000 프레

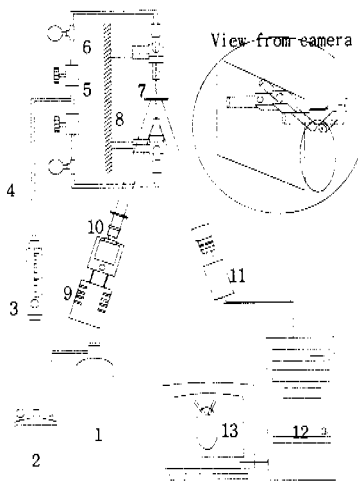
임이고, 광원은 초고압 수은램프를 사용하였으며, 액막 후면에 광원을 위치시키고 빛의 고른 분포를 위하여 산란판(diffuser)을 광원 앞에 놓았다.

2.2 실험조건

액막 두께를 결정하는 변수로써 본 실험에서 사용한 실험 변수는 총돌각, 오리피스 직경, 액막 원주각, 제트 속도, 액체 물성치 중 점도 등이다. 총돌 전 제트 속도는, 측정 유량과 오리피스 직경으로부터 추정된 제트 속도가 실제 측정된 제트 속도와 일치함을 보여준 Foster와 Heidmann⁽¹¹⁾의 연구 결과를 근거로 유량을 측정하여, 계산하였다. 실제로 실험이 행해진 제트 속도 범위에서 오리피스 직경과 제트 직경이 일치하는지에 대해서 가시적으로 측정된 결과, 정확히 일치하는 것으로 나타났다. Dombrowski⁽¹⁰⁾의 선형 분무 노즐의 연구 결과에 의하면 액막 두께에 영향을 미치는 액체의 물성치는 표면 장력과 점도가 지배적인 것으로 보고되었으며, 본 연구에서는 액체의 점도가 액막 두께에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 글리세린과 물의 혼합액을 사용하였으며, 글리세린의 중량비로써 액체의 점도를 변화시켰다.

Table 1은 실험 조건들이며, 그룹 1은 총돌각, 2는 제트 속도, 3은 오리피스 직경, 4는 원주각의 변화에 따른 액막 두께 변화를 파악하고자 하였다. 90° 이상의 원주각에 대한 프린지 해석은 프린지간의 너무 조밀한 간격 때문에 불가능하였으며, 제트 속도는 해석 가능한 가장 작은 액막에서부터 과도한 충격력에 의해 액막이 분열하거나, 액막 표면이 불안정해지는 속도까지 측정하였다. 실제 로켓 엔진의 분사 압력은 15-25 MPa 정도이지만, 본 연구에서는 낮은 분사 압력에 의해 형성되는 액막 특성에 주안점을 두었기 때문에, 분사 압력은 약 0.4 MPa 정도의 매우 낮은 조건에서 실험이 수행되었다. 글리세린 수용액을 이용한 실험에서는 점도 변화에 따른 액막 두께 변화를 보기 위해 물의 조건과 같은 속도, 오리피스 직경, 총돌각에서 실험을 수행하였다.

Table 2는 사용한 액체의 물성치를 나타낸 것이며, 괄호 안 값은 물과의 상대적 값을 나타낸다. 글리세린의 중량비를 50%, 59%, 68%로 하였을 때, 물의 점도를 기준으로 하여 6, 10, 20 배 가되는 글리세린 수용액이 되었다. 액체의 굴절



- 1. N₂ Gas Cylinder
- 2. Pressurized Liquid Tank
- 3. Flowmeter
- 4. Liquid Supply Line
- 5. Flow Control Valve
- 6. Pressure Gauge
- 7. Glass Tube
- 8. Rotation Stage
- 9. Mercury Lamp
- 10. Interference Filter
- 11. CCD Camera
- 12. PC
- 13. Monitor

Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Test conditions

Liquid	Group	D (mm)	θ (°)	ϕ (°)	V (m/s)	Rej
Water	1	1.0	40~70	0	3.0	3000
	2	1.0	50, 60	0	2.5 ~3.8	2510 ~3750
	3	0.5, 0.8 1.0	40~60	0	3.6, 4.0	2000 ~3600
	4	0.8	60	0~90	5.1	4060
50% Glycerol	2	1.0	60	0	2.8 ~4.8	510 ~900
	4	1.0	60	0~90	4.8	900
59% Glycerol	1	1.0	50~70	0	3.0	340
	2	1.0	60	0	2.3 ~3.5	260 ~400
	4	1.0	60	0~90	4.8	540
68% Glycerol	1	1.0	50, 60	0	3.0	180
	2	1.0	60	0	2.7 ~3.6	160 ~220
	4	1.0	60	0~90	4.8	290

Table 2 Physical properties of liquids

Liquid	Water	50% G	59% G	68% G
Density (kg/m ³)	998 (1.00)	1124.9 (1.13)	1149.5 (1.15)	1174.2 (1.18)
Viscosity (N s/m ³)	1.002 (1.00)	6.05 (6.04)	10.25 (10.23)	19.40 (19.36)
Surface Tension × 10 ³ (N/m)	72.88 (1.00)	69.68 (0.96)	68.70 (0.94)	67.72 (0.93)
Refractive Index	1.333	1.3981	1.4107	1.4242

물은 굴절률 측정기(Refractometer, Cambridge Instruments Inc.)를 사용하여 측정하였다.

2.3 두께 측정 방법

얇은 액막의 두께를 측정하는 방법에는 전자파의 반사, 굴절 현상 등을 이용하는 방법, 모아레 토포그래피(Moire Topography), 두께 변화에 따른 전도도의 변화율로부터 두께를 추정하는 방법, 직접 날카로운 바늘을 액막 표면까지 접근시켜 측정하는 방법 등이 이용되고 있다. 본 연구에서는 빛의 간섭 현상을 이용한 비접촉식 액막 두께 측정 방법을 이용하였다. Fig. 2(b)에 나타난 것처럼, 단색광을 얇은 층에 비추게 되면, 전면과 후면에서 반사되는 빛의 광학적 경로차가 발생하여, 반사되는 두 빛들은 서로 간섭 현상을 일으키고, 경로차에 따라서 액막 표면에 밝고 어두운 프린지를 형성하게 된다. 이 프린지의 간격이 얇은 층의 두께와 연관성이 있게 되며, 프린지 해석을 통하여, 액막 두께를 알 수 있게 된다. 따라서, 이 방법은, 액막 두께를 진 영역에서 파악할 수 있으며, 유동 흐름을 전혀 방해하지 않는 비접촉식이라는 장점을 가지고 있다.

미소한 두께 변화를 갖는 액막에서 두께가 h 인 임의의 점에서의 위상차 Φ 는

$$\Phi = 2hncos\beta \quad (8)$$

이며, 여기서 n 은 굴절률, β 는 굴절각이다. 이 경로차가 $\lambda/2$ 의 홀수배가 되면 보강, 짝수배가 되면 소멸 간섭을 일으킨다. 따라서 인접한 두 프린지 사이의 두께 변화 Δh 는

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2ncos\beta} \quad (9)$$

로 표시된다. 프린지 이미지에서 해석이 가능한 첫 번째 프린지까지의 반지름 r_1 과 임의의 반지름 r_2 위치에서의 두께 차이는, h 와 r 과의 관계인 식 (1)로부터

$$h_1 - h_2 = K\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (10)$$

이다. 또한 r_1 과 r_2 위치에서의 프린지 개수를 각각 N_1, N_2 라 하면 식 (9)로부터

$$h_1 - h_2 = (N_2 - N_1) \frac{\lambda}{2ncos\beta} \quad (11)$$

이며, 식 (10)과 (11)로부터

$$\frac{1}{r_2} = -\frac{\lambda(N_2 - N_1)}{2Kncos\beta} + \frac{1}{r_1} \quad (12)$$

가 구해진다. 여기서 λ, n, β 값들은 프린지와는 관계 없는 고유 상수이며, K 값은 액막 두께를 결정하는 동일 조건에서는 상수로 볼 수 있으며

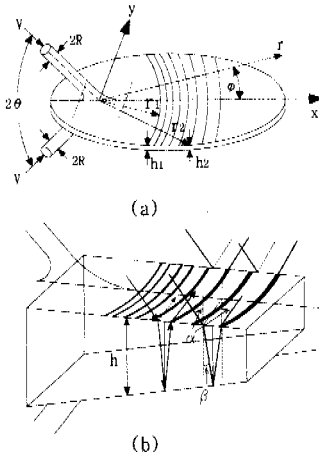


Fig. 2 Measurement method of liquid sheet thickness; (a) pattern of interference fringes on the sheet (b) interference of light rays in a thin sheet

로 $1/r_2$ 과 $N_2 - N_1$ 사이에는 선형적 관계가 성립됨을 알 수 있다. 이 직선의 기울기를 m 이라 하면 액막 두께 상수 K 는

$$K = -\frac{\lambda}{2mm\cos\beta} \quad (13)$$

로 정의되며, 입사각 α 와 굴절각 β 의 관계를 이용하면,

$$K = -\frac{\lambda}{2mm(1 - \sin^2\phi/n^2)^{1/2}} \quad (14)$$

로 표현되고, 여기서 구해진 K 값을 이용하여 식 (1)로부터 액막의 입의 위치에서의 두께를 알 수 있게 된다.

3 실험결과

두께 측정 해석에 사용된 프린지 사진으로부터 프린지 개수와 충돌점으로부터의 위치를 측정하여 그 결과를 그려보면 Fig. 3과 같고 식 (12)에 나타난 것과 같이 $1/r_2$ 과 $N_2 - N_1$ 사이의 선형적인 관계를 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 구해진 K 값을 이용, 식 (1)

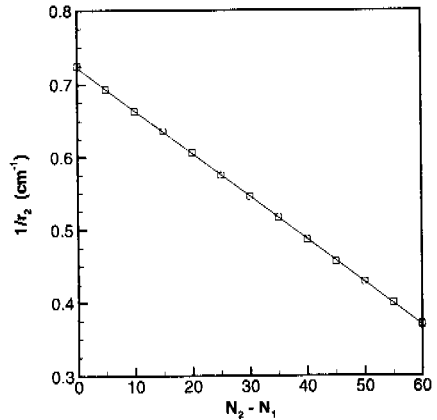


Fig. 3 Relation between $N_2 - N_1$ and $1/r_2$ for $\theta=60^\circ$, $D=1.0$ mm, $V=3.6$ m/s

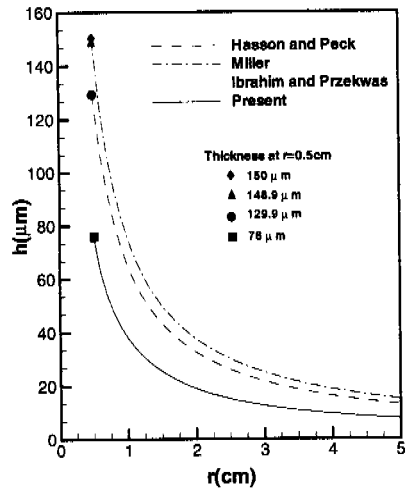


Fig. 4 Comparison of the sheet thickness with theoretical predictions for $\theta=60^\circ$, $D=1.0$ mm, $V=3.6$ m/s

에 의해 구해진 액막 두께와 기존의 이론적 모델링에 의한 값을 비교한 그림이다. 전반적으로 기존 이론식들이 실험 측정값보다 상당히 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 이론적 두께 예측식들이 실제 액막 생성 단계에서 발생하는 여러 요인들을 간략히 가정하여 유도되었기 때문으로 생각된다. 즉, 이론식들은 제트의 기하학적 상관관계와 속도, 액막 자체의 유동만을 고려하여 유도된 식들이며, 액막 주위의 공기역학적 상

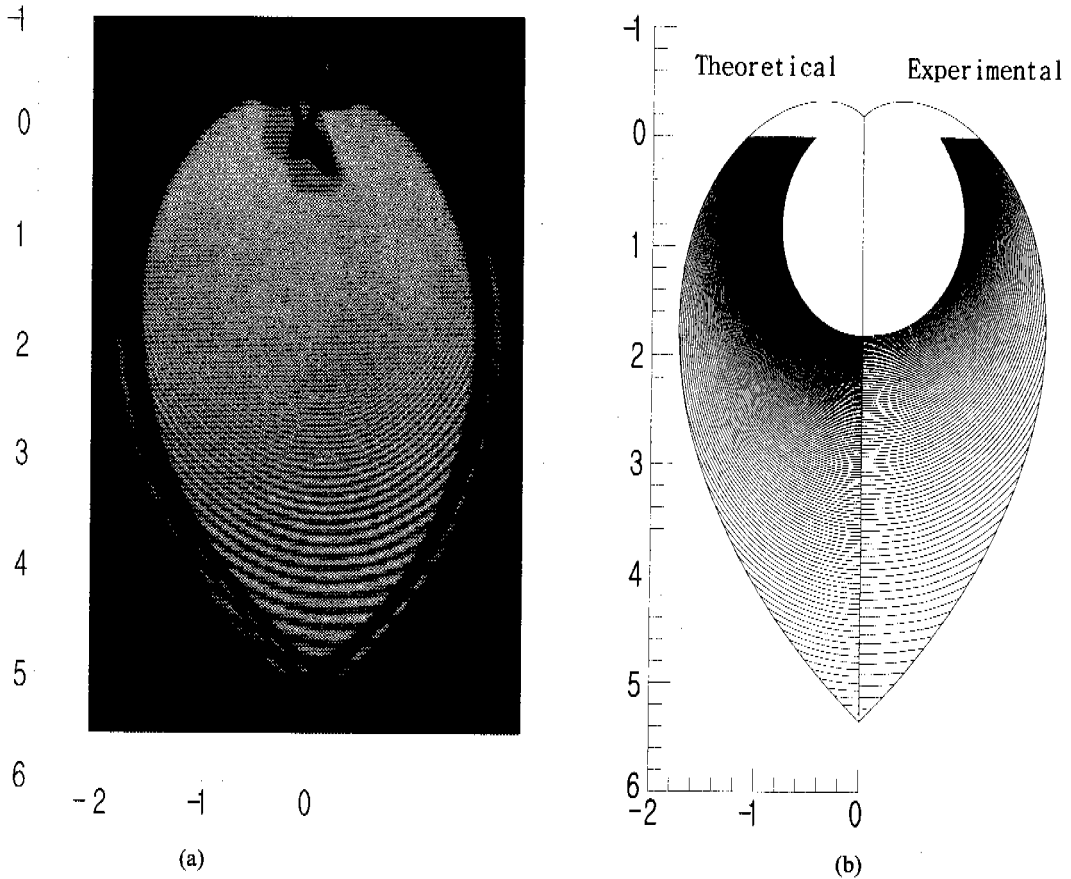


Fig. 5 Comparison of the sheet thickness with theoretical predictions; (a) photograph of the typical fringe pattern for $\theta=60^\circ$, $D=0.8$ mm, $V=5.5$ m/s (b) fringe patterns produced by theoretical prediction and by experiment

관 관계, 액막 가장자리에서 떨어져나가는 액적들에 의한 실질적인 액막 체적의 감소는 전혀 고려되지 않았다. 또한, 액체의 물성치가 미칠 수 있는 영향도 고려되지 않았다.

Fig. 5는 대표적인 프린지 사진과 실험적으로 구해진 K 값을 가지고 재생된 프린지 패턴, 이론식에 의해 구해지는 프린지 패턴을 비교하여 보여주고 있다. 프린지 사진에서 간격이 좁으면 두께 변화가 심하고, 간격이 크면 심하지 않음을 의미한다. 따라서, 충돌점에서 멀어질수록 두께 변화가 감소함을 알 수 있다. 실험적으로 재생된 프린지들은 사진의 프린지들과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 반면에 이론식에 의해 재생된 프린지들은 프린지 사진, 실험적으로 재생된 프린지들에 비해 간격이 더 좁은 것을 알 수 있고, 이

는 이론적 예측식이 실제 액막 두께를 정확히 예측하지 못하고 있음을 보여주는 결과이다.

본 실험 결과 뿐만 아니라, 동일 충돌각($\theta=60^\circ$)에서 액막 두께를 실험적으로 측정된 이전 연구 결과와 이론식들을 비교한 Fig. 6을 보면, 항상 실험적 측정값이 이론적 예측값보다 낮음을 알 수 있다. 이러한 이론적 예측값과 실제 측정된 액막 두께와의 차이를 검증하기 위하여 마이크로미터를 이용하여 충돌점에서 5 mm 떨어진 위치에서 액막이 폭 $100 \mu\text{m}$ 사이를 통과하는지를 확인하였다. 동일 위치에서 실험적 액막 두께는 $76.0 \mu\text{m}$ 이고, 가장 실험적 측정값에 가까운 Hasson과 Peck⁽⁷⁾의 이론식에 의한 두께는 $129.9 \mu\text{m}$ 이다. 액막이 폭 $100 \mu\text{m}$ 사이는 아무런 장애 없이 통과하는 것으로 관찰되어 이론적 액막 두께

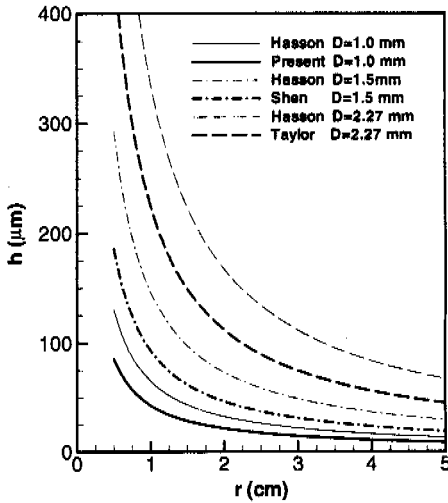


Fig. 6 Comparison of previous experimental results with theoretical predictions

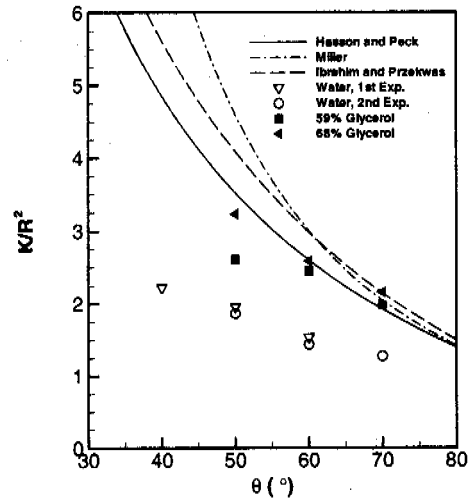


Fig. 8 Effect of the impinging angle on the sheet thickness for $D=1.0$ mm, $V=3.0$ m/s

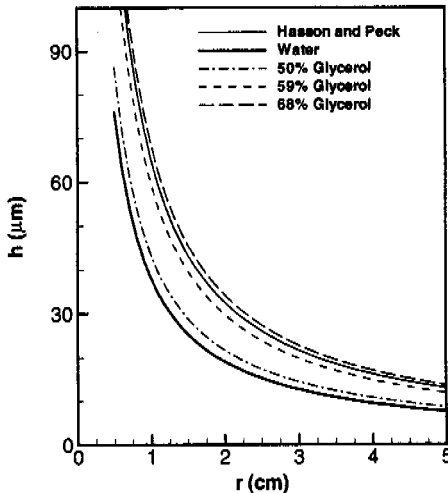


Fig. 7 Effect of liquid viscosity on the sheet thickness for $\theta=60^\circ$, $D=1.0$ mm, $V=3.6$ m/s

예측이 실제 액막 두께를 과대 예측하였음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 액체의 점도 변화가 액막 두께에 미치는 영향을 보여 주는 그림이다. 점도가 높아진 50%, 59%, 68% 글리세린 수용액은 점도가 증가함에 따라 액막 두께도 역시 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 8은 충돌각 θ 의 변화에 따른 액막 두께

변화를 나타낸 그림이다. 액막 두께 상수 K 는 무차원변수 K/R^2 으로 나타내었으며, 충돌각이 증가할수록 액막 두께는 감소함을 알 수 있다. 이는 충돌각이 증가함에 따라 액막의 수직 방향으로의 충격력이 커지게 되어 같은 반지름 위치에서 액막의 폭이 증가하게 된다. 따라서, 액막의 두께는 충돌각이 증가할수록 감소하게 된다. 이론적인 예측도 충돌각이 증가할수록 감소하는 경향은 보여 주고 있지만 크기에 있어서는 실험적 측정값과 큰 차이를 보여 주고 있다.

Fig. 9는 제트 속도의 변화가 액막 두께 상수에 미치는 영향을 보여 주는 그림이다. 두께 예측 이론식들은 충돌 전 제트 속도가 형성되는 액막 두께에 영향을 미치지 않음을 보여 주고 있으며 무차원화한 액막 두께 상수값은 가장 오차가 적은 Hasson과 Peck⁽⁷⁾의 식을 이용하면, $\theta=50^\circ$ 일 때 3.52, 60° 일 때 2.6으로 실험값보다 매우 높게 나타나고 있다. 실험 결과는 제트 속도가 2.5 m/s에서 3.75 m/s까지 증가하면서 액막의 크기는 3~4배 정도로 증가하였음에도 불구하고 액막 두께 상수값은 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 이는 제트 속도의 증가에 의하여 유량은 증가하지만, 액막의 두께는 일정하게 유지되면서 액막의 폭만이 증가하고 있음을 나타낸다.

Fig. 10은 오리피스 직경 변화가 액막 두께에 미치는 영향을 보여 주는 그림이다. 두께 예측

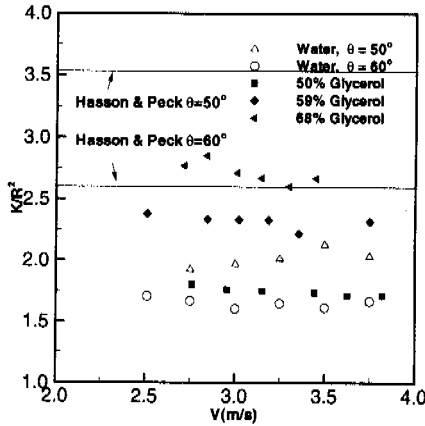


Fig. 9 Effect of the jet velocity on the sheet thickness for $\theta=50^\circ$ and 60° , $D=1.0$ mm

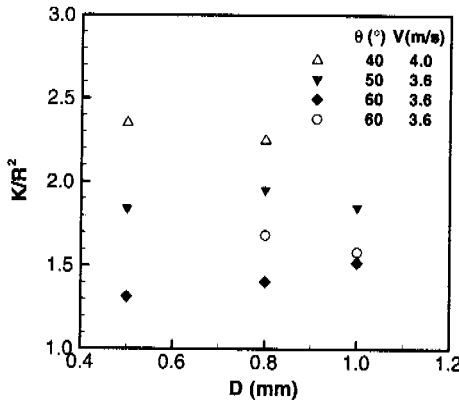


Fig. 10 Effect of the orifice diameter on the sheet thickness

이론식들을 살펴보면, 액막 두께는 R^2 에 비례하지만, R^2 으로 무차원화시키면, 오리피스 직경과는 무관하고, 충돌각 θ 와 원주각 ϕ 만의 함수로써 표현된다. 따라서 무차원 액막 두께 상수가 오리피스 직경과는 무관하여야 하지만, 제트 속도와 충돌각을 일정하게 하고 오리피스 직경만을 변화시킨 실험 결과는 약간의 차이가 있음을 보여주고 있다.

Fig. 11, 12는 $\theta=60^\circ$, $D=0.8$ mm, $V=5.08$ m/s인 실험 조건에서 원주각 ϕ 의 변화에 따른 액막 두께 변화를 보여 주고 있다. 사용 액체가 물인 경

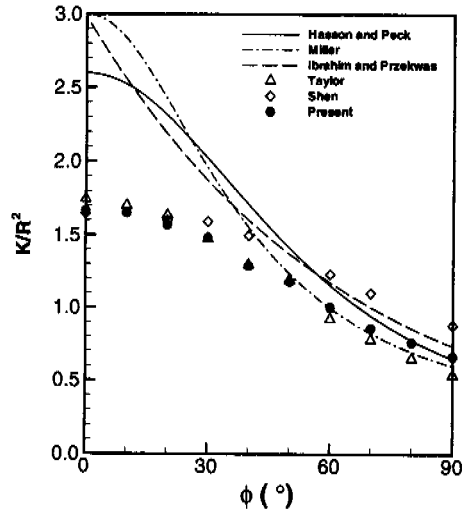


Fig. 11 Variation of the sheet thickness with the azimuthal angle for water, $\theta=60^\circ$, $D=0.8$ mm, $V=5.1$ m/s

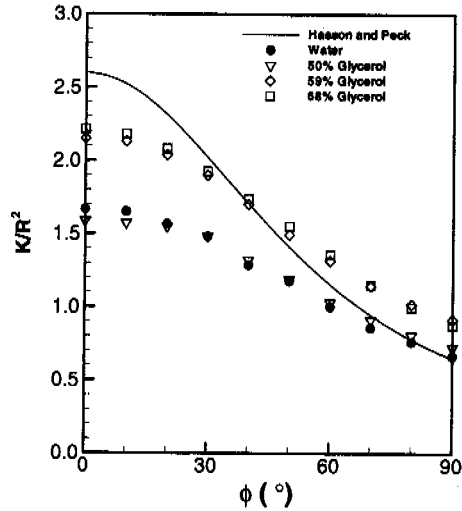


Fig. 12 Variation of the sheet thickness with the azimuthal angle for glycerol, $\theta=60^\circ$, $D=0.8$ mm, $V=5.1$ m/s

우인 Fig. 11에서는 전반적으로 액막 두께는 $\phi=0^\circ$ 에서 가장 두껍고 ϕ 가 증가할수록 감소하고 있음을 알 수 있다. 본 실험 결과와 Taylor⁽²⁾와 Shen⁽³⁾의 실험 결과를 비교해 보면, 제트의 속도와 사용 오리피스 직경은 서로 다르지만, 액막 두께가 이들 조건과는 무관하기 때문에 Shen⁽³⁾의

ϕ 가 큰 경우를 제외하고는 상당히 일치하는 결과를 보여 주고 있다. 또한 이론식들과 비교해보면, 이론식들이 $\phi=0^\circ$ 에서 실험적 측정값들과 가장 차이가 심하고 ϕ 가 증가하면서 그 차이가 감소되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 12에서 50% 글리세린 수용액은 물의 경우와 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났으며, 59%, 68% 글리세린 수용액에서는 물이나 50% 글리세린 수용액의 값보다 상당한 차이를 보이고 있다. 그리고 ϕ 가 증가하면서 두께의 감소 정도가 물의 경우보다 점도가 높은 값일수록 다소 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 고속촬영카메라를 사용하여 찍은 액

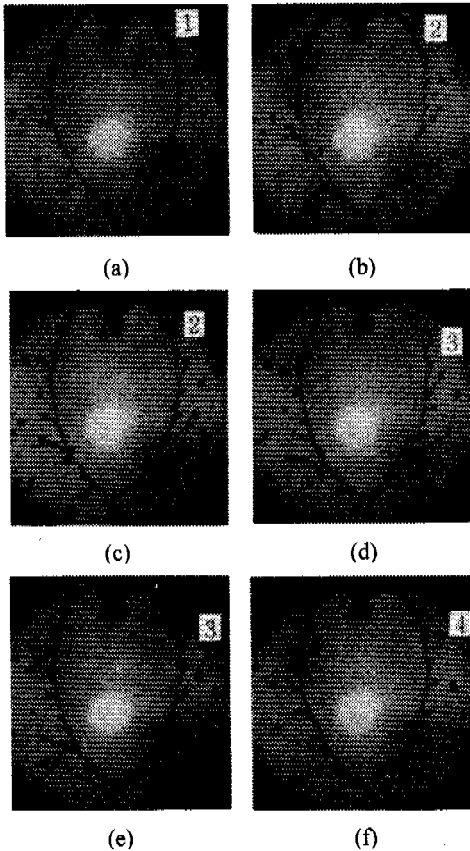


Fig. 13 Series of photographs showing the mechanism of droplet disintegration from the edge of liquid sheet for $\theta = 60^\circ$, $D=0.8$ mm, $V=3.04$ m/s

적의 분열 과정을 보여 주는 사진들이다. 액막의 가장자리에는 액체가 모여들어 상당한 두께의 실린더 형태의 띠가 형성되고 이 띠 안의 유체는 액막의 하단 끝점으로 모이는 유동이 형성된다. 이 띠의 표면에 공기역학적 불안정성을 포함하는 복합적 원인에 의한 파동이 형성되어 조그만 돌기가 형성된다(Fig. 13(a) 1). 돌기가 형성된 부분은 액체가 더욱 모여들어 커져나가는 풍선처럼 크기가 커져나가면서 동시에 액막 끝부분으로 유동하는 액체에 의해 하부로 이동되어 나간다(Fig. 13(b), (c) 2). 가장자리 띠로부터 액체 공급이 더 이상 진행되지 못하면, 돌기의 크기는 더 이상 커지지 않고 구형의 형태를 갖게 되고 조그만 띠 형태로 액막으로부터 분리된다(Fig. 13(d), (e) 3). 띠의 길이가 어느 정도 길어지게 되면 띠의 끝 부분에 있던 비교적 큰 액체가 액적으로 분리되고 이를 연결시키고 있던 띠 부분도 끊어지면서 조그만 액적들로 생성된다(Fig. 13(f) 4). 따라서, 액막 주변에서 관찰되는 비교적 큰 액적들은 띠 형태로 연결되는 끝 부분에서 분리된 액적들이고 작은 액적들은 연결시키는 띠가 분리되어 형성된 액적들로 볼 수 있다.

액적 분열이 일어나는 돌기는 처음에는 액막 가장자리에 수직인 방향으로 발전되어 나가지만, 길이가 길어지면서 액막 끝으로 이동하는 액체에 의해 액막 하부로 이동되어 가기 때문에 분열되는 액적을 연결하는 띠가 중력에 반대 방향으로 성장해 나가는 것을 알 수 있다(Fig. 13(d), (e) 3).

4. 결론

본 연구에서는 빛의 간섭 현상을 이용하여 충돌 제트에 의해 형성되는 액막의 두께를 실험적으로 측정하여, 두께 특성을 파악하고, 기존 이론적인 모델링과 비교하였으며, 고속촬영카메라를 이용하여 액막 주변에 생성되는 액적 분열 메커니즘에 관하여 연구하였다.

실험적으로 측정된 액막 두께는 충돌각이 증가할수록, 오리피스 직경이 감소할수록, 원주각이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈으며, 제트의 속도와는 무관함을 보여주었다. 이론적 예측식들은 실험적으로 측정된 경향과는 일치하였지만, 원주각이 낮은 경우는 실험적 측정값보다 높은 두께를 예측하였다. 하지만, 원주각이 90° 에 접근

할수록 그 차이는 점점 감소하였다. 점도의 증가에 따른 액막 두께는 점도가 높아질수록 두께 역시 증가하는 것으로 나타났다.

액막 주변에 생성되는 액적들은 액막 가장자리에 형성된 실린더 형태의 띠에서 돌기가 커져서 얇은 띠로 액막과 연결되어 있다가, 끝 부분이 분리되어 비교적 큰 액적을 생성하고, 연결시키는 띠가 분리되어 작은 액적들이 생성됨을 관찰하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(981-1009-058-1) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (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) Shen, Y., Impinging Jet Atomization at Elevated and Supercritical Ambient Conditions, 1997, Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Chicago.
- (4) Kang, B. S., Shen, Y. B., Poulikakos, 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.
- (5) Ranz, W. E., 1959, "Some Experiments on the Dynamics of Liquid Films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 30, No. 12, pp.1950~1955.
- (6) Miller, K. D., 1960, "Distribution of Spray From Impinging Liquid Jets," *Journal of Applied Physics*, Vol. 31, pp.1132~1133.
- (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) Ibrahim, E. A. and Przekwas, A. J., 1991, "Impinging Jets atomization," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, No. 12, pp. 2981~2987.
- (9) Couto, H. S. and Bastos-Netto, D., 1991, "Modeling Droplet Size Distribution from Impinging Jets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 7, No. 4, pp. 654~656.
- (10) Dombrowski, N. Hasson, D., and Ward, D. E., 1960, "Some Aspects of Liquid Flow Through Fan Spray Nozzles," *Chemical Engineering Science*, Vol. 12, pp. 35~50.
- (11) 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.