

# 디지털 현미경 홀로그래피 기법을 이용한 마이크로 액체 제트 유동에 관한 실험적 연구

이한열\* · 이재호\*\*,† · 신원규\*,†

## Experimental Study on the Characteristics of Micro Jet Flow Using Digital Microscopic Holography

Haneol Lee\*, Jaiho Lee\*\*,† and Weon Gyu Shin\*,†

**Abstract** In this study, the effect of injection pressure on the column diameter and droplet velocity of liquid jet with the weakly turbulent Rayleigh-like breakup mode is experimentally studied using digital microscopic holography (DMH). The injection nozzle has the diameter of 50  $\mu\text{m}$  and injection pressure is varied from 0.1 to 0.4 MPa. When the micro liquid jet is injected into still air, the double-pulsed holograms was recorded on a CCD sensor and numerically reconstructed in order to obtain well focused images. In this study, the liquid column diameter from 50  $\mu\text{m}$  orifice nozzle is shown to be changed slightly but the droplet velocity is increased proportionally as the injection pressure is increased.

**Key Words** : Digital microscopic holography (디지털 현미경 홀로그래피), Micro liquid jet (마이크로 액체제트), Drop breakup (액적 분리), Numerical reconstruction (수치적 재구성)

### 기호설명

$L_c$  : breakup length  
 $d$  : nozzle diameter  
 $We$  : Weber number  
 $Re$  : Reynolds number  
 $Oh$  : Ohnesorge number  
 $\rho_L$  : density of liquid  
 $u_0$  : liquid velocity at nozzle exit

$\mu_L$  : viscosity of liquid  
 $\sigma$  : surface tension of liquid  
 $t$  : time interval between two pulse laser  
 $P$  : injection pressure

### 1 서론

액체제트(Liquid jets)는 가스터빈 인젝터, 디젤 인젝터, 의학용 스프레이뿐만 아니라, 잉크젯 프린팅, 마이크로 디바이스 쿨링 등 여러 산업분야에서 다양하게 사용되어왔다. 액체제트는 산업 각 분야에서 사용되는 목적에 따라 다르게 기능하도록 설계되어야 하므로 액체제트의 분열 메커니즘에 대한 이해와 연구 분석이 지속적으로 진행되어 왔다.

† E-mail: wgshin@cnu.ac.kr, jaiholee@khnp.co.kr

\* School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

\*\* Korea Hydro & Nuclear Power Co.

예를 들어 정지된 기체 내 분사되는 마이크로 스케일의 액체제트의 분열길이(break-up length)는 미세 액적이 생성되는 지점을 나타내기 때문에 중요하다며, 제트 액주(liquid column)의 두께 변화는 평균 분열길이 및 액적 생성에 영향을 주는 요소이다<sup>(1)</sup>. 대기 중의 액체 제트에 관한 기존의 실험적 연구는 노즐 직경이 밀리미터 단위의 거시적규모(macro-scale)에 대해서 주로 수행되어 왔다(2-6). Grant and Middleman (1966)은 난류 액체 제트(turbulent liquid jet)의 Weber수와 분열길이에 관한 다음과 같은 상관식을 개발하였다:

$$\frac{L_c}{d} = C_c We^{0.32} \quad (1)$$

여기서  $L_c$ 는 분열길이,  $d$ 는 노즐직경,  $We$ 는 Weber 수 이고,  $C_c$ 는 실험에 의해 결정되는 상관계수이다. Sallam et al.<sup>(5)</sup>은 난류액체제트의 분열길이를 Weber 수에 따라 약한 난류 레일레이류 분열 모드(weakly turbulent Rayleigh-like breakup mode), 난류 분열 모드(turbulent breakup mode), aerodynamic bag/shear 분열모드 3가지 영역으로 구분하고 pulsed shadowgraph photograph를 이용한 액체제트의 분열길이에 관한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서 Sallam et al.<sup>(5)</sup>은 자신의 측정데이터와 Chen and Davis<sup>(2)</sup>, Grant and Middleman<sup>(3)</sup>의 측정 데이터를 토대로 기존의 분열길이와 Weber 수와의 상관식을 개량하였다. Lee and Sallam<sup>(1)</sup>은 디지털 현미경 홀로그래피(digital microscopic holography, DMH)를 이용해 직경100  $\mu\text{m}$ 오리피스에서 분사되는 액체 제트의 Weber 수에 따른 도출해 그 결과를 Chen and Davis<sup>(2)</sup>, Grant and Middleman<sup>(3)</sup>, Sallam et al.<sup>(5)</sup>의 결과와 비교하여 기존의 상관식이 지름이 100  $\mu\text{m}$ 인 오리피스 노즐에서 분사되는 액체제트에서 적용될 수 있는지를 연구하였다. Lee and Sallam<sup>(1)</sup>의결과는 기존의 결과(Chen and Davis<sup>(2)</sup>, Grant and Middleman<sup>(3)</sup>, Sallam et al.<sup>(5)</sup>)와 주어진 제트 출구조건에 대해 잘 일치하는 결과를 보이지만, 상관식의 실험적 상관계수의 크기는 감소하는 것을 보고하였으며, 이는 노즐 형상의 변화(노즐

출구의 길이 대 직경비)에서 비롯된 것이라고 기술하였다.

Lee and Sallam<sup>(1)</sup>과 Chen and Davis<sup>(2)</sup>의 연구는 각각100  $\mu\text{m}$ , 320 – 620  $\mu\text{m}$ 의 노즐에 대해 실험을 하여 Grant and Middleman<sup>(3)</sup>, Sallam et al.<sup>(5)</sup>의 연구에 비해 비교적 미시적 규모이나, 100  $\mu\text{m}$  이하의 미시적 규모(micro-scale)의 오리피스 노즐에 대해서는 연구가 진행되어 있지 않다.

디지털 현미경 홀로그래피 기술을 이용한 마이크로스케일 액체제트의 관측은 이전의 연구에서 그 타당성이 증명된 바 있다. 본 연구에서는 Lee and Sallam<sup>(1)</sup>과 Lee et al.<sup>(7)</sup>의 연구에서 사용된 홀로그래피 기술을 이용하여 지름이50  $\mu\text{m}$ 인 오리피스 노즐에서 분사되는 액체 제트의 이미지를 획득하고, 획득한 이미지를 수치적으로 재구성(numerical reconstruction)을 통해 약한 난류 레일레이류 분열 모드 영역에서 평균액주두께와 분사압력에 따른 제트의 속도를 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1디지털 현미경 홀로그래피 장치 구성

본 연구에서는 DMH를 이용하여 50  $\mu\text{m}$  오리피스에서 분사되는 액주를 촬영하고, 액주의 크기를 측정하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 DMH 광학 장치를 구성을 나타낸다. 실험장치는 Fig. 1과 같이 공간필터(Spatial filter), CCD카메라(pco. 2000, PCO.), 펄스발생기(pulse generator), 532 nm 파장을 갖는 double pulsed Nd:YAG 레이저, 지름이50  $\mu\text{m}$ 인 오리피스 노즐로 구성되어 있다. 공간필터는 20x 배율의 대물렌즈(microscopic objective lens), 25  $\mu\text{m}$  핀홀(pinhole)로 구성되어 있다. 분사압력이 50  $\mu\text{m}$  오리피스 노즐에서 분사되는 물(deionized water) 액주의 두께에 미치는 영향을 알아보기 위하여 노즐에 작용하는 압력을 0.1 ~ 0.4 MPa로 변화시켰으며, 오리피스 노즐을 1 mm정확도를 갖는 XYZ 스테이지에 마운트 시켜 높이 방향으로 이동하면서 액주를 관찰할 수 있도록 하였다. 노즐에 작용하는 압력을 0.1 ~ 0.4 MPa로 변화시켰을 때 노즐 출구 액체제트의 Reynolds 수( $Re = \rho_L u_0 d / \mu_L$ )는 705

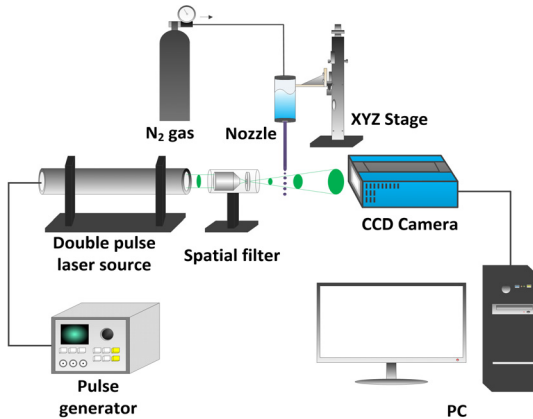


Fig. 1. Optical setup of digital microscopic holography for measuring liquid jet diameter ejected from 50  $\mu\text{m}$  orifice nozzle

$\sim 1,411$ , Weber 수( $We = \rho_L u_0^2 d / \sigma$ )는 137 ~549, Ohnesorge 수( $Oh = \mu L / (\rho L d \sigma)^{1/2}$ )는 0.016이다.

## 2.2 액주의 두께 및 제트 속도 측정

디지털 현미경 홀로그래피를 이용한 50  $\mu\text{m}$  오리피스 노즐에서 분사되는 액체제트의 액주두께 및 속도를 측정하기 위한 과정은 다음과 같이 이루어진다. 먼저 레이저빔을 확장하기 위해서 현미경대물렌즈를 사용하고 핀홀에 통과시켜 레이저빔을 공간필터링(spatial filtering)해준다. 분무되는 액적의 속도를 측정하기 위하여 펄스발생기를 이용하여 double pulsed Nd:YAG 레이저에서 발생하는 두 레이저 사이의 간격을 20  $\mu\text{s}$  조절하고 두 개의 빔은 동일한 광학경로(optical Path)로 진행하도록 정밀하게 조정(alignment)되었다. 20x 배율의 대물렌즈를 통과한 레이저빔은 25  $\mu\text{m}$  핀홀을 통과하여 구면파로 확장되는데, 이 확장된 구면파는 시준화(collimation)되지 않고 직접 액주가 존재하는 측정영역을 통과하게 된다. 액주에 의해서 회절된 구면물체파(object wave)는 구면기준파(reference wave)와 간섭을 일으키고, 이 간섭패턴이 CCD 카메라에 저장된다 (Fig. 2).

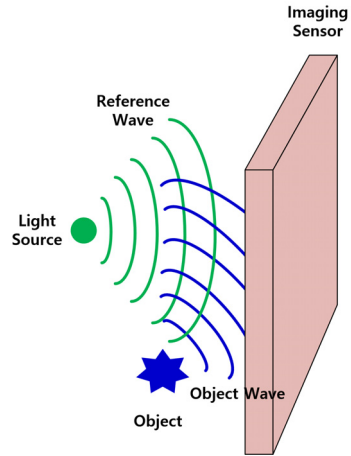


Fig. 2. Schematic diagram of reference wave and object wave

디지털홀로그래피현미경의 배율과 해상도는 핀홀에서부터 CCD센서까지의 거리에 의해서 결정된다. 삼차원공간에 분포한 물체들의 간섭정보를 모두 담고 있는 한 장의 홀로그램 이미지를 수치적으로 재구성하면 수많은 평면이미지들을 얻을 수 있게 된다. 그리고 재구성된 평면이미지들을 연속적으로 분석하면 삼차원 공간 내 물체의 위치와 크기를 확인 할 수 있다. 하지만 시준화된 평면파를 사용하는 인라인 디지털 홀로그래피와(in-line digital holography) 달리 DMH는 시준화되지 않은 구면파를 사용하기 때문에 구면파의 파원(wave Source)인 핀홀로부터 거리에 따라 분무 입자들의 크기 배율이 달라지게 된다<sup>(8)</sup>. 이 때문에 홀로그래피 이미지를 재구성하는 과정에서 공간크기 보정(spatial scale calibration)이 필요하게 된다.

본 연구에서는 공간크기 보정을 위해 Fig. 3과 같이 Lee et al.<sup>(7)</sup>의 방법을 참고하여 레일마운트(rail mount)에 크기를 알고 있는 핀을 위치시키고, 일정 간격으로 이동시키면서 홀로그램이미지를 촬영, convolution method를 이용하여 Fig. 4와 같이 촬영한 이미지를 재구성하고 Fig. 5와 같이 재구성된 이미지의 강도(intensity)를 측정하여 1픽셀(pixel)이 실제 차지하는 크기를 측정하였다.

오리피스 노즐에서 분사되는 액주의 두께 및 속도는 double pulsed 레이저를 이용하여 액주의 홀로그램이미지를 얻음으로써 구할 수 있다. 수치적

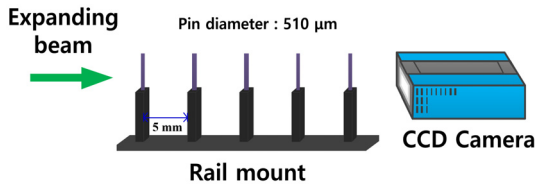


Fig. 3. Schematic diagram of five pins used for the spatial scale calibration of reconstructed hologram images

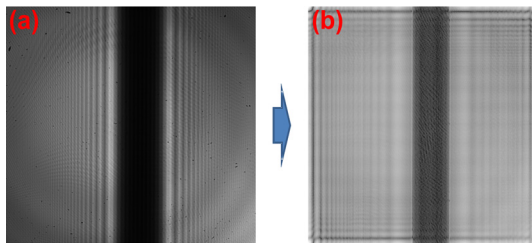


Fig. 4. Hologram images: (a) original image, (b) reconstructed image at the focus plane

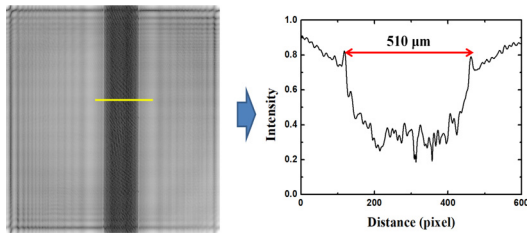


Fig. 5. Intensity profile of the reconstructed hologram image

으로 재구성된 액주의 홀로그램 이미지들을 중첩 (overlay)시켜 비교함으로써 특정시간  $\Delta t$  동안 액주의 이동거리를 통해 속도를 구할 수 있고, Fig. 4와 마찬가지로 액주 이미지의 강도를 프로파일링 함으로써 두께를 측정할 수 있다. 여기서  $\Delta t$ 는 펄스 발생기를 통해 조절한 두 펄스 레이저의 시간 간격으로 정의하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 공간크기 보정

Fig. 6은 핀의 실제 크기와 수치적으로 재생된 핀 이미지가 차지하는 픽셀의 비를 재생길이에 따

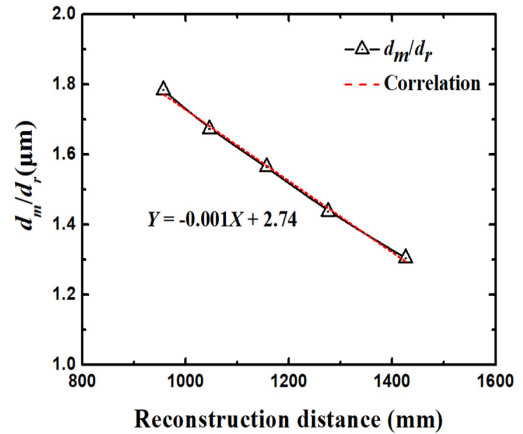


Fig. 6. Relationship between reconstruction distance and the ratio of the measured pin diameter to its reconstructed pin diameter

라 나타낸 그래프이다. 선형관계식을 통해 얻은 재생길이에 1픽셀이 나타내는 실제 크기와의 관계식은 아래와 같다.

$$Y = -0.001X + 2.74 \quad (2)$$

여기서 Y는 1픽셀이 나타내는 실제 크기( $\mu\text{m}$ )를, X는 액주의 재생길이(mm)를 나타낸다. 측정된 액주의 재생길이는 1138 mm이며, 이때 1픽셀이 나타내는 1.602  $\mu\text{m}$ 이다.

#### 3.2 액주의 두께 및 제트 속도 측정

Fig. 7은 오리피스 노즐에 작용하는 압력을 0.1 - 0.4 MPa까지 변화시켰을 때 토출되는 액주에서 분열된 액적을 double pulsed 레이저를 이용하여 홀로그램 촬영 후 재구성한 이미지를 나타낸 것이다. 그림 상에서 첫번째 펄스(first pulse)와 두번째 펄스(second pulse) 사이의 간격  $\Delta t$ 는 펄스발생기를 통해 20  $\mu\text{s}$ 로 조정하였다. 액적의 속도는 이미지 프로세싱을 통해 first pulse 이미지에서 나타난 액적의 중심에서 second pulse 이미지에서의 액적의 중심까지의 거리를 시간간격  $\Delta t$ 로 나누어 측정하였으며 두 이미지 사이의 거리는 Fig. 5에서 구한 공간보정값을 이용하였다.

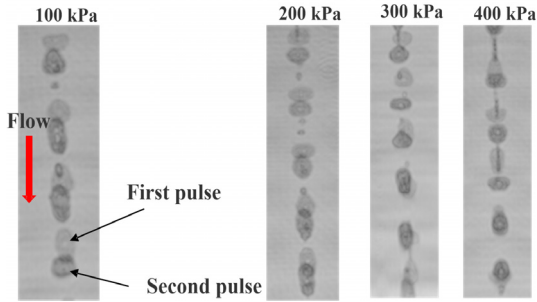


Fig. 7. Double pulsed reconstructed images on the same frame with 20  $\mu$ s delay between two pulse lasers corresponding to various injection pressures. (the liquid jet flowing from top to bottom of image)

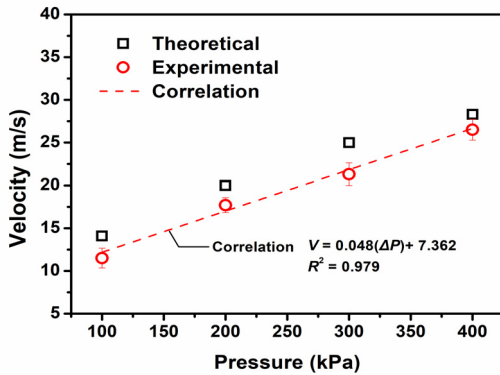


Fig. 8. Experimentally measured velocities using DMH method and theoretical velocities corresponding to various injection pressure

액적의 속도는 오리피스 노즐에 작용하는 압력이 증가할수록 증가하게 된다(Fig. 8). 디지털 현미경 홀로그래피를 이용해 측정된 액적의 속도는 이론식을 통해 구한 값과 비슷한 값을 가지며 이론적인 속도는 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$V_{theoretical} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_L}} \quad (3)$$

Fig. 9는 분사압력 변화에 따른 액주 두께의 변화를 보여준다. 각각의 분사압력에 따른 액체의 Reynolds 수 및 Weber 수를 그림에 나타내었다.

Sallam et al.<sup>(5)</sup>의 구분에 따르면 위의 Weber 수 영역은 weakly turbulent Rayleigh-like breakup mode에 있다. 해당 이미지들은 액주 부분이 잘 보일 수 있도록 크롭(crop)되어 있으며, 원본 이미지는 2048 px × 2048 px이다. 재생된 홀로그래프 이미지의 강도 측정을 통해 구한 액주의 평균 두께는 41 ~ 43  $\mu$ m로 수축(contraction)에 의해 오리피스의 직경보다는 약간 작은 값을 가지며, 0.1 ~ 0.4 MPa까지 분사압력의 변화에서는 압력에 따른 액주두께의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. Lee and Sallam<sup>(1)</sup>의 경우 turbulent breakup 영역 ( $We = 900 \sim 4,900$ ,  $Re = 2,500 \sim 5,800$ )에서 액주의 두께 변화에 대해 연구하였는데, 난류액체제트의 경우 액주 유동의 축방향에 대해 변동성분(fluctuation)에 의해 액주의 두께가 불안정하게 변하나, 부드러운 층류 액체제트(smooth and laminar jet)의 경우 액주 유동의 축방향에 대해 변동이 거의 없이 액주의 두께가 일정하며 액주의 두께 변화는 Weber 수의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보고하였다. 본 연구에서 실험 결과는 Weakly turbulent Rayleigh-like breakup mode ( $We = 705 \sim 1,411$ ,  $Re = 137 \sim 549$ )에 속하기 때문에 Lee and Sallam<sup>(1)</sup>의 결과와 직접적인 비교는 힘들으나, 오리피스에 노즐에서 발생하는 제트의 유동이 부드러운 층류제트에 해당하므로 Lee and Sallam<sup>(1)</sup>의 결과를 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

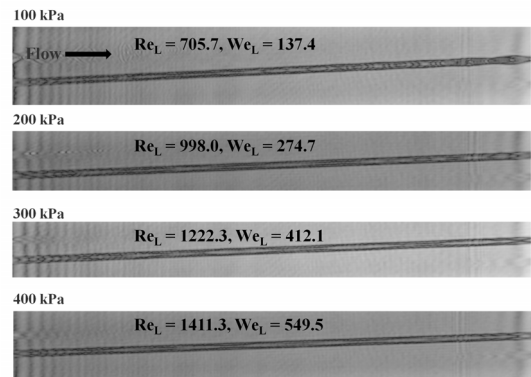


Fig. 9. Reconstructed liquid jet images when injection pressure is varied from 0.1 to 0.4 MPa.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 디지털 현미경 홀로그래피를 이용하여 50  $\mu\text{m}$  오리피스 노즐에서 분사되는 액체 제트의 분사압력에 따른 평균 액주 두께 및 속도를 측정하였다. 본 실험에서 연구된 액체제트는 weakly turbulent Rayleigh-like breakup mode에서 해당하고 오리피스 노즐에서 분사되는 제트는 부드러운 층류 액체제트의 형태를 보이며, 유동의 축방향에 대해 액주 두께의 변동성분이 거의 없이 안정적이다. 마이크로 액체제트의 평균 액주 직경은 41 - 43  $\mu\text{m}$  로서 수축에 의해 오리피스 직경보다는 작은 값을 가지며, 분사압력에 따라 큰 변화를 보이지 않았다.

#### 후 기

본 연구는 충남대학교 2016년도 CNU 학술연구비 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- 1) Lee, J. and Sallam, K.A., 2017, "COLUMN THICKNESS VARIATION OF 100- $\mu\text{m}$  LIQUID JETS IN STILL AIR," Atomization and Sprays, Vol. 27, pp.31-43.
- 2) Chen, T.F. and Davis, J.R., 1964, "Disintegration of a turbulent water jet," Journal of the Hydraulics Division, Vol. 90, pp.175-206.
- 3) Grant, R.P. and Middleman, S., 1966, "Newtonian jet stability," AIChE Journal, Vol. 12, pp.669-678.
- 4) Wu, P.K. and Faeth, G.M., 1995, "Onset and end of drop formation along the surface of turbulent liquid jets in still gases," Physics of Fluids, Vol. 7, pp.2915-2917.
- 5) Sallam, K.A., Dai, Z. and Faeth, G.M., 2002, "Liquid breakup at the surface of turbulent round liquid jets in still gases," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 28, pp.427-449.
- 6) Sallam, K.A. and Faeth, G.M., 2003, "Surface properties during primary breakup of turbulent liquid jets in still air," AIAA journal, Vol. 41, pp.1514-1524.
- 7) Lee, J., Miller, B. and Sallam, K.A., 2009, "Demonstration of digital holographic diagnostics for the breakup of liquid jets using a commercial-grade CCD sensor," Atomization and Sprays, Vol. 19, pp. 445-446.
- 8) Schnars, U. and Jüptner, W.P., 2002, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms," Measurement science and technology, Vol. 13, pp. 85-101.