

# 아음속 수직분사제트에서 액적크기 특성에 대한 실험적 연구

김민기\* · 송진관\* · 김진기\* · 황용석\*\* · 윤영빈†

## An Experimental Study on Droplet Size Characteristics of Liquid Jets in Subsonic Crossflow

Min-Ki Kim, Jinkwan Song, Jinki Kim, Yongseok Hwang, Youngbin Yoon

**Key Words:** Transverse Injection(수직분사), Cavitation(캐비테이션), Hydraulic flip effect(수력튀김현상), SMD(Sauter Mean Diameter; 평균액적크기), PLLIF(Planar Liquid Laser Induced Fluorescence; 평면 레이저 유도형광법), Angled Injection(분사각도 분사), Reverse Injection(대향분사)

### Abstract

The spray characteristics and drop size measurements have been experimentally studied in liquid jets injected into subsonic crossflow. With water as fuel injection velocity, injection angle and atomizer internal flows were varied to provide of jet operation conditions. The injector internal flow was classified as three modes such as a non-cavitation flow, cavitation, and hydraulic flip flows. Pulsed Shadowgraph Photography measurement was used to determine the spatial distribution of the spray droplet diameter in a subsonic crossflow of air. And this study also obtains the SMD (Sauter Mean Diameters) distribution by using Planar Liquid Laser Induced Fluorescence technique. The objectives of this research are get a droplet distributions and drop size measurements of each condition and compare with the other flow effects. As the result, This research has been showned that droplet size were spatially dependent on air-stream velocity, fuel injection velocity, injection angle effects, and normalized distance from the injector exit length( $x/d$ ,  $y/d$ ). There are also different droplet size characteristics between cavitation, hydraulic flip and the non-cavitation flows.

### 1. 서 론

황단류의 공기유동에 수직으로 분사하는 액체연료 제트는 빠른 속도의 공기 유동장에서 구동하는 램제트 엔진이나 스크램제트 엔진, 가스터빈 엔진의 후기연소기(after burner)등 공기를 산화제로 사용하는 추진기관의 연료 분사장치로 사용되며, 이러한 추진 및 동력장치 이외에도 항공기 엔진의 성능향상 및 안정성을 위한 유동

제어, 터빈블레이드 등의 막냉각, 연소불안정성을 보정하기 위한 2차 분사장치 유동의 능동제어 등에 이용된다. 일반적으로 황단류 유동장에 수직으로 분사되는 연료의 분무 구조는 세가지 영역으로 정의할 수 있다. 초기 분사 직후 인젝터 노즐의 크기에 비례하여 유지되는 액주 영역(liquid column region), 분열이 시작되어 후류의 액적보다 다소 큰 액적이 존재하게 되는 영역(ligament region), 이후 작은 액적으로 미립화 되는 액적 영역(spray plume region, droplet region)으로 나눌 수 있다<sup>(1)</sup>. 황단류에 분사된 액체제트의 선단에서는 유체 유동이 지연되고 압력이 상승하며, 액체제트의 후단에서는 양단에서 서로 반대 방향으로 회전하는 와류(vorticity)를 형성하며 동시에 황단류는 액체제트의 주위 가장자리에 전단력을 주어 액체가 찢어져 나가고, 잘게 부서지는 미

(2007년 6월 23일 접수 ~ 2007년 6월 28일 심사완료)

\*서울대학교 기계항공공학부

\*\*국방과학연구소

†윤영빈, 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)887-2662

립화 현상이 나타나게 된다<sup>(2)</sup>. 이러한 분무과정은 다수의 복잡한 현상들이 상호 밀접하게 연결되어 있어 복합적인 현상으로 나타난다. 특히 고속 유동장에서 구동하는 램 제트 엔진에서 액체연료는 높은 밀도와 발열량으로 그 이용이 증가하고 있으나, 연료의 착화에 앞서 연료의 증발과 연료와 공기의 혼합의 시간을 필요로 하고, 불충분한 혼합 시간으로 인한 연료액적의 증발 및 혼합은 연소기의 성능 저하와 화염의 불안정성을 초래하게 된다. 따라서 연료의 미립화 과정, 산화제와 연료의 혼합메커니즘의 규명은 연소기의 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

Adelberg 등<sup>(3)</sup>은  $We \cdot Re > 10^6$  이상인 가속파 영역에서 액적크기와 오리피스 크기 및 분열 파장과 관계된 실험식을 제시하였고, Ingebo 등<sup>(4)</sup>은 Scanning radio meter의 기법을 사용하여 액주영역에서 공력학적인 힘에 의해서 액주표면에 발생하는 파장을 연구하였고,  $We \cdot Re < 10^6$ 인 모세관 영역과 가속파 영역의 액적크기에 대한 관계식을 제시하였다. Kihm 등<sup>(5)</sup>은 액적의 크기를 Malvern system으로 측정하여 공기의 유속, 연료분사 속도, 침투거리, 진행방향 거리, 등에 의한 변수를 Buckingham PI Theorem으로 실험식을 제시하였다. 또한 Wu 등<sup>(6)</sup>은 액적영역에 대한 분무구조를 연구하여, 분무 단면의 분포와 중심선을 따른 분무 특성, flux에 대하여 평균화한 동특성, 분무에 대한 관계식을 도출하였다. 또한 PDPA 기법으로 액적 영역의 SMD분포를 제시하였다. Sankar 등<sup>(7)</sup>은 레이저 응용 측정기법에 의해 얻은 형광신호 및 산란신호의 강도 값으로 SMD분포를 얻을 수 있는 식을 제시하였다. 그리고 Tamaki 등<sup>(8)</sup>의 결과에서 캐비테이션 현상은 분열·분무 특성에 큰 영향을 주는 것으로 보고되었다. Ahn 등<sup>(9)</sup>은 캐비테이션과 수력튀김 현상이 액주 분열 과정에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하였다. 따라서 본 연구에서는 직접 사진촬영으로 인한 정상유동에서의 액적들의 크기 및 분포를 관찰하고, 분사 각도에 의한 SMD의 차이와 캐비테이션 및 수력튀김 현상과 같은 분사기 내부형상의 조건에 따른 액적 크기의 차이 및 PLLIF(Planar Liquid Laser Induced Fluorescence) 기법의 레이저 응용 측정기법을 이용하여 SMD분포를 확인 하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 분사기설계

인젝터의 출구 지름( $d$ )은 0.5 mm이며, 내부는 오리피

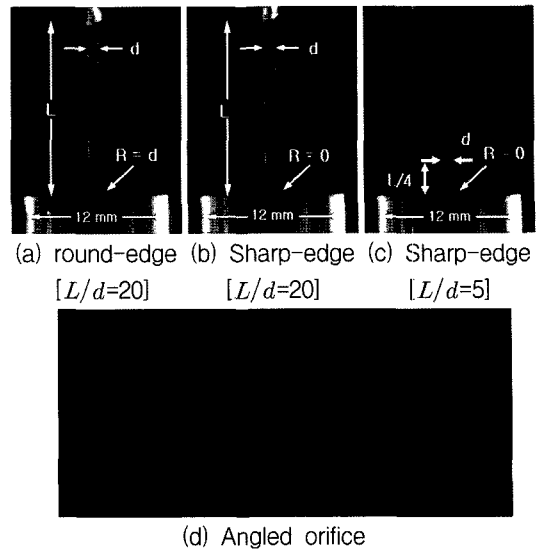


Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental Conditions

parameter	value
Air velocity	60 m/s
Air temperature	300 K
Fuel temperature	318 K (45°C)
Fuel	Water : Ethanol = 4 : 1 (20%)
Orifice Diameter	0.5 mm
Orifice Shape	Round edged ( $L/d = 20$ ), Sharp edged ( $L/d = 5, 20$ )
P(bar)	1, 2, 3, 4, 5, 6
$x/d$	40, 60, 80, 100, 120
Injection angle	30°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150°

스와 챔버로 이루어졌다. 챔버의 지름( $D$ )은 12 mm로  $D/d=24$ 이다. 챔버와 오리피스의 접선 구간의 곡률에 따라 캐비테이션이 발생하는 유동과 발생하지 않는 유동이 결정되므로 Fig. 1의 (a), (b), (c)와 같이 유입구에 곡률이 없는 오리피스(sharp edged orifice)와 곡률이 있는 오리피스(round-edged orifice)를 대조군으로 설정했다. 곡률은 유입구의 반경( $r$ )과 오리피스의 지름이 같은  $r/d=1$ 로 하였는데  $r \leq 0.14d$ 일 경우 vena contracta가 형성되지 않아 캐비테이션이 발생하지 않는다. 곡률이 없는 인젝터는 오리피스 길이( $L$ ) 대 지름 비( $L/d$ )가 5, 20인 인젝터 두 가지를 실험하였다. 일반적으로  $L/d \leq 8$ 인 경

우 수력튀김현상이 발생한다고 알려져 있으며, 캐비테이션과 수력튀김 현상을 확인하기 위하여  $L/d$ 를 각각 다르게 제작하였다. 또한 분사각도에 의한 액적크기의 특성을 확인하기 위하여 Fig. 1의 (d)와 같은 분사각도가 30°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150°인 오리피스를 제작하여 실험하였다.

### 2.2 실험조건 및 방법

우선 정상유동, 캐비테이션, 수력튀김현상이 나타나는 조건을 구하기 위하여 유량실험을 하여 유량 변화의 경향을 알아보았다. 또한 액적을 직접사진 촬영 기법을 통해 분석하고자 하여 Canon MP-E 65 mm f/2.8 1-5x Macro Photo 접사촬영 렌즈를 장착한 디지털 카메라 (Canon EOS 20D)와 광원인 스트로보스코프를 동기화하여 인젝터 외부 유동 현상과 Table 1에서의 조건과 같이 각각의 위치에서 액적을 촬영하였다. 이때 확대비는 pixel당 약 2  $\mu\text{m}$  정도 확대 하였고, 각 조건에 3000~4000 개의 액적을 촬영하여 오차 범위를 5%이하로 들어오게 하였다<sup>(10)</sup>. 그리고 SMD의 분포를 구하기 위하여 형광신호와 산란 신호의 강도값을 얻을 수 있는 PLLIF 기법을 이용하여 분무 구조를 관찰하였다. Fig. 2는 PLLIF 실험의 장치와 직접사진촬영기법의 실험장치 사진이다. 실험을 수행하기 위하여 조사되는 레이저에 발광하는 염료가 혼합이 잘되게 하기 위해 물과 에탄올을 4대 1로 섞고 Aldrich F245-6 형광 염료를 섞은 실험 연료를 사용하였다. 가시화 영역의 크기는 50 mm×50 mm×330 mm이며, 20마력 송풍기를 사용하여 60 m/s의 공기를 불어넣어 주었다. 본 실험에서는 LEXEL사의 아르곤-이온 레이저를 사용하였으며, 아르곤-이온 레이저에서 조사된 빔은 Dantec사의 Fiber-optics를 사용하여 평면광으로 전환하였다. 평면 레이저 유도형광 기법을 통하여 얻은 형광신호와 산란신호를 DSLR 카메라로 측정하였다. Canon EOS D30에 28-105 mm 표준 렌즈를 장착하고 이미지의 확대를 위하여 vivitar의 2x 확대 렌즈를 장착



Fig. 2 Experimental Setup for PLLIF and Direct Photograph Technique

하여 이미지를 크게 확대하였다. 그리고 양쪽의 카메라 각각에 550 nm 하이패스 필터와 514±5 nm 밴드패스 필터를 장착하여 형광신호와 산란신호를 얻었다. 또한 작동유체는 각각의 내부유동 조건을 형성하기 위해서 온도 조절이 가능하도록 제작된 실린더에 채워서 실험을 수행하였다. 실린더는 온도 센서를 부착하였고, 이 센서에 의해 측정되는 온도를 기준으로 PID 조절기로 원하는 온도로 가열할 수 있도록 설계되었다. 실린더에 걸리는 압력은 레귤레이터에 의해 조절되었다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1 내부유동조건별 유량측정

정상유동, 캐비테이션유동, 수력튀김현상이 나타나는 각각의 내부유동조건에서의 분출되는 유량을 측정하였다. 먼저 작동유체는 캐비테이션 현상을 주기 위하여 45°C로 상승시켰고, 염료를 첨가한 실험연료를 사용하였다. Fig. 3은 분사압력 차이를 1 bar부터 6 bar 까지 증가시키며 각각 실험 인젝터들의 유량을 측정하고, 유량 계수(Discharge Coefficient:  $C_d$ )를 구하여 연료의 속도에 따른 각 조건에서의 변화를 그린 그래프이다. 각 인젝터 모두 캐비테이션 현상이 발생하기 전에는 압력이 증가할수록 유량 계수가 서서히 증가하는 경향을 보여준다. 일정 압력이 되면 곡률이 있는 정상유동의 인젝터의 경우 압력이 증가하더라도 유량 계수는 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되었고, 곡률이 없는 인젝터의 경우

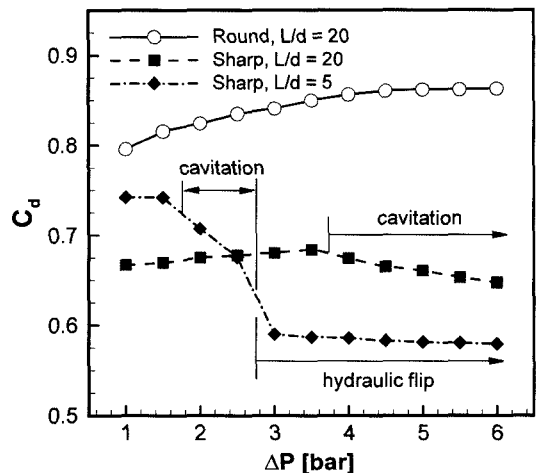


Fig. 3 Discharge Coefficients of each injection pressure difference

압력이 어느 정도 이상 높아진 경우 캐비테이션이 발생하면서 유량계수가 감소하게 된다.  $L/d=5$ 인 수력튀김현상을 발생시키는 인젝터의 경우는 2bar부터 캐비테이션이 발생하여 유량 계수가 감소하다가 vena contracta가 발전하여 유로와 유동이 분리되어 수력튀김 현상이 발생함에 따라 유량 계수가 일정한 모습을 나타내었다.

3.2 평면레이저유도형광기법을 통한 액적 분포

Lorenz-Mie 이론에 따르면 입자의 지름에서 구형 입자에 의한 탄성 산란의 세기는 액적의 지름, 산란각도, 액적의 굴절률, 편광, 입사광의 파장 등의 복잡한 함수로 나타내어진다. 그러나 Sankar 등<sup>(7)</sup>은 분무된 액적에 의해 약한 흡수가 일어나는 경우, Mie 산란강도가 지름의 제곱에 비례하는 관계로 근사할 수 있다는 사실을 계산을 통해서 구하였다. 좌표  $(x, y)$ 로 정의되는 카메라 화소에서 측정된 Mie 산란신호의 강도  $G_S$ 와 액적 지름  $d$ 사이의 관계는 입사광의 강도가  $I_0$ 일 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_S(x, y) = I_0(x, y)c_s \sum N_i(x, y)d_i^2(x, y) \quad (1)$$

여기서  $N_i$ 는 지름이  $d_i$ 인 액적의 개수,  $c_s$ 는 이론적으로 계산되거나 실험적으로 구할 수 있는 비례상수이다. 한편, 형광 신호의 강도는 약한 흡수가 일어날 경우 형광 분자의 농도에 비례한다. 따라서, 형광 염료가 시험 유체 내에 균일하게 분포하고 증발 등의 효과로 액적 내의 성분의 변화가 없다면, 형광 신호의 강도는 유체의 체적, 즉 질량에 비례한다. 그래서 좌표  $(x, y)$ 로 정의되는 카메라의 화소에서 측정되어지는 형광 신호 강도와 액적 지름의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_f(x, y) = I_0(x, y)c_f \sum N_i(x, y)d_i^3(x, y) \quad (2)$$

여기서  $c_f$ 는 비례상수이며,  $N_i(x, y)d_i^3(x, y)$ 는 측정 체적을 지나는 유체의 체적에 비례하므로, 유체의 밀도가 일정할 경우 형광 신호의 강도는 입사광 강도와 측정 체적을 지나는 총질량  $\delta m$ 에 비례하는 값을 나타내게 된다.

$$G_f = G_f' I_0(x, y)\delta m = C_f I_0(x, y)\rho \quad (3)$$

만일 평면광이 전체 산란면에 대해서 균일한 강도 분포를 가지고, 분무를 지나면서 감쇠가 일어나지 않는다면 카메라에 기록되는 신호의 강도는 오로지 연료의 질량 밀도  $\rho$ 에만 비례한다. 질은 분무에서는 입사광이 분무를 통과할 때 액적들에 의한 감쇠 현상이 강하게 일어나므로, 광원의 조사 방향에 가까운 위치에서 신호가

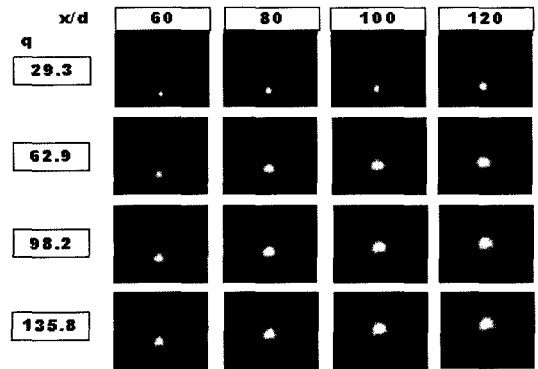
강하게 나타난다. 따라서 정확한 분무 패턴을 얻기 위해 레이저를 순차적으로 좌우에서 조사하여 각각의 이미지를 얻은 후 이를 기하 평균하는 Talley 등이 제안한 알고리즘을 사용하였다. 그리고 앞에서 구했던 식(2)을 식(1)로 나누어 비를 구하면,

$$\frac{G_f(x, y)}{G_S(x, y)} = \frac{c_f}{c_s} \left[ \frac{\sum N_i(x, y)d_i^3(x, y)}{\sum N_i(x, y)d_i^2(x, y)} \right] \quad (4)$$

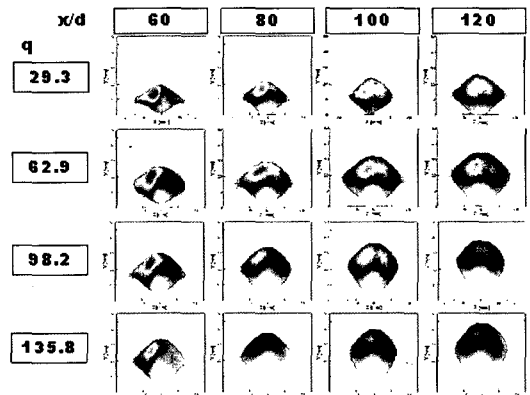
와 같으며 SMD의 정의로부터 위의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{32}(x, y) = \frac{1}{K} \left[ \frac{G_f(x, y)}{G_S(x, y)} \right] \quad (5)$$

이 때  $D_{32}(x, y)$ 는 좌표  $(x, y)$ 에서의 SMD이고,  $K$ 는 보정 상수이다. 따라서 형광 신호와 산란 신호의 비율을 통해서 상대적인 SMD 분포를 구할 수 있으며 적절한 보정상수  $K$ 를 구한다면 평면에 대한 절대적인 SMD 분포를 구할 수 있다. 이에 본 연구에서는 평면레이저유도



(a) LIF Images



(b) SMD Distributions

Fig. 4 Cross-Sectional distributions of SMD and LIF images at normal flow,  $\Delta P=4\text{bar}$

형광기법을 통해 형광신호와 산란신호를 얻었고 각각의 위치에서 직접사진촬영기법으로 얻은 액적의 사진을 통해 보정상수 K를 구하여 Fig. 4와 같이 각각의 내부유동조건에서 공기유동장의 후류를 따라가면서 평면에 대한 LIF 측정값과 보정상수에 의한 같은 영역에서의 SMD 분포를 얻을 수 있었다. 그림에서 분무분포가 한쪽에 강도가 치우친 현상을 볼 수 있는데 이것은 Fric 등<sup>(2)</sup>이 제안한 분무가 진행하면서 vortex에 의하여 분무가 안쪽으로 말려들어가는 현상 때문에 순간적으로 분무의 분포가 밀하게 되어 생기는 것으로 판단하고 있다.

마찬가지로 Fig. 4에서와 같이 분사차압이 같은 조건에서 분무가 후류로 진행하면 SMD가 작아짐을 확인할 수 있고, 각각의 plume 영역에서 공기유동에 대한 액적들의 모멘텀에 의해 큰 액적들이 상단에 분포하는 경향을 확인할 수 있고, 50  $\mu\text{m}$ 이하의 아주 미세한 액적은 바닥으로 깔려 아래 부분에 분포함을 알 수 있다.

### 3.3 액적크기특성

직접사진 촬영기법으로 정상유동의 경우와 캐비테이션, 수력튀김현상이 나타날 경우 및 분사각도에 따른 액적을 촬영하였다. Fig. 5는 분사각도에 따른 분무의 그림이며 고 확대비로 얻은 액적의 그림이다.

우선 Fig. 6은 공기유동장에 90° 분사되는round-edge

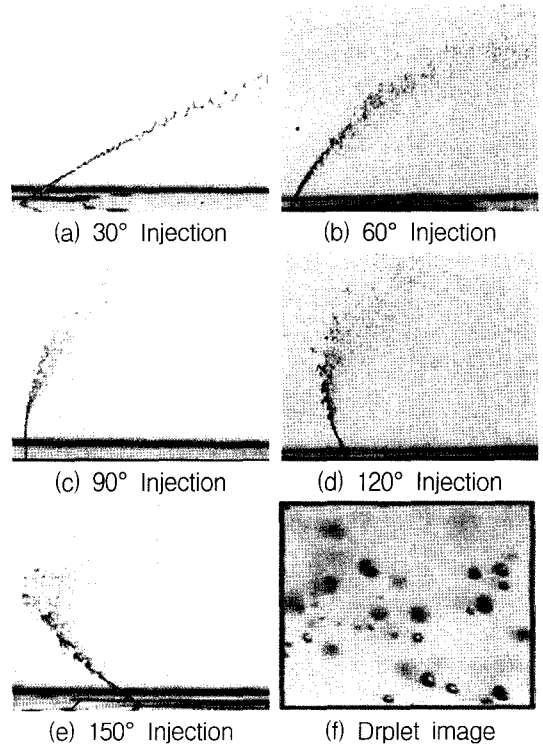


Fig. 5 Spray patterns by various injection angle effects and the high magnification droplet images

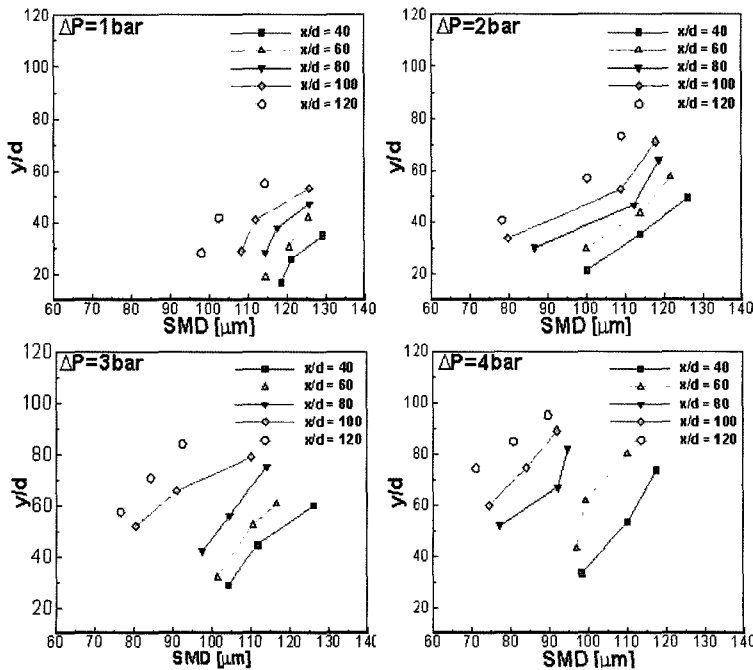


Fig. 6 SMD versus y for different injection pressure and normalized distance x/d at the non-cavitation flow

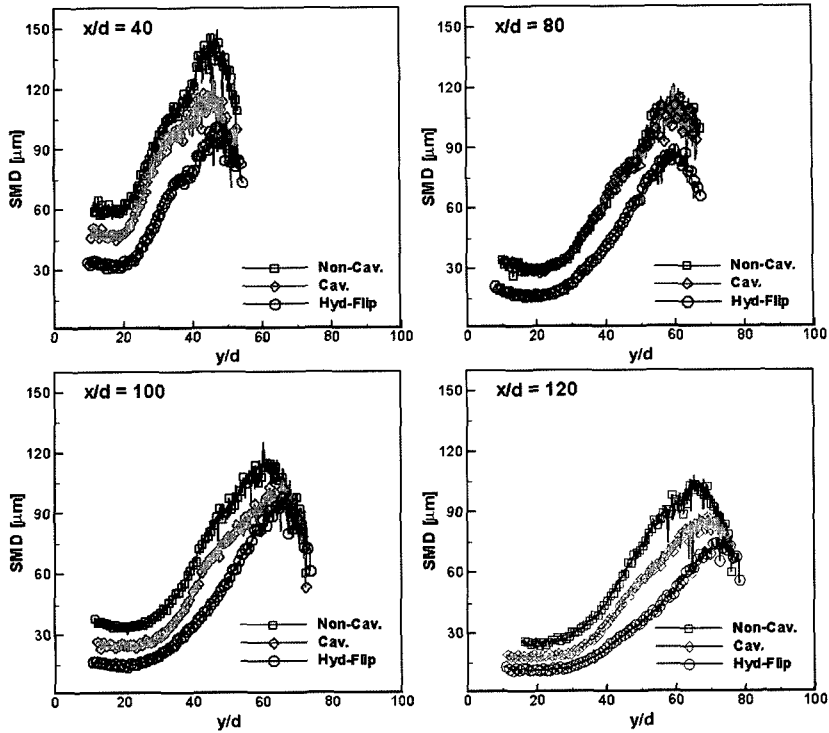


Fig. 7 Centerline properties at various axial locations of non-cavitation, cavitation, hydraulic flip flows ( $v_f = 21.05$  m/s,  $d = 0.5$  mm)

인젝터를 이용한 정상유동조건에서 고 확대비를 이용하여 촬영한 액적들을 이미 이전 논문에 의해 검증되었던 이미지 프로세싱 기법<sup>(11)</sup>을 통하여 얻은 SMD값이다. 본 실험과 같이  $We \cdot Re > 10^6$ 인 고속파의 경우 오리피스 출구의 액주영역에서 아랫부분의 분열파장이 윗부분의 분열파장의 크기보다 작게 되어 y/d값이 작아질 수록 SMD는 작아지는 현상을 볼 수 있다. 또한 분사차압의 증가로 인한 연료분무속도가 증가할 수록 유동장에 침투거리가 커지므로 더 많은 영역의 응력 작용으로 액적이 분열하여 SMD는 작아지는 현상을 관찰 할 수 있고, 액적이 공기유동장의 유동 진행방향으로 진행할 수록 더 많은 공력학적 항력과 전단력에 의해 액적이 작아지는 현상도 관찰 할 수 있다<sup>(6)</sup>.

Figure 7에서는 평면레이저유도형광기법으로 얻은 SMD분포의 결과의 값에서 중앙부분 축방향 프로파일을 얻은 그래프이다. 분사속도의 조건이 일치한 상태에서 캐비테이션이 발생하게 되면 정상유동의 경우보다 난류강도가 강해져서 이러한 캐비테이션 현상에 의한 액적들의 끌음현상으로 동일한 조건에서 다른 내부유동의 경우 즉 정상유동에서 보다 액적이 작아짐을 확인

Table 2 Parameter Ratios

parameter	non-cavitation	cavitation	hydraulic flip
$\frac{(\dot{m})_{effect}}{\dot{m}}$	1	0.75~0.80	0.66
$\frac{(\dot{A})_{effect}}{\dot{A}}$	1	1	0.77
$\frac{(v_f)_{effect}}{v_f}$	1	0.75~0.80	0.86

할 수 있었다. 또한 수력튀김 현상이 발생하면 아래 Table 2에서와 같이 정상유동에서의 경우보다 오리피스의 유효지름이 77%가 감소하여 유량이 68%정도 배출하게 되어서 마찬가지로 동일한 조건보다 상대적으로 액적이 작아짐을 확인 할 수 있었다. 여기서 캐비테이션 현상이 일어나는 경우는 단순 끌음현상으로 액적이 작아지는 것이지만 수력튀김현상이 발생하면 다른 정상유동과 캐비테이션이 발생한 유동에서와는 달리 액주영역의 물기둥의 크기가 작음으로서 발생하는 유량이 다소 작은 특성으로 동일한 지점에서 다른 경우에서 보다 액적이 작은 것을 알 수 있다.

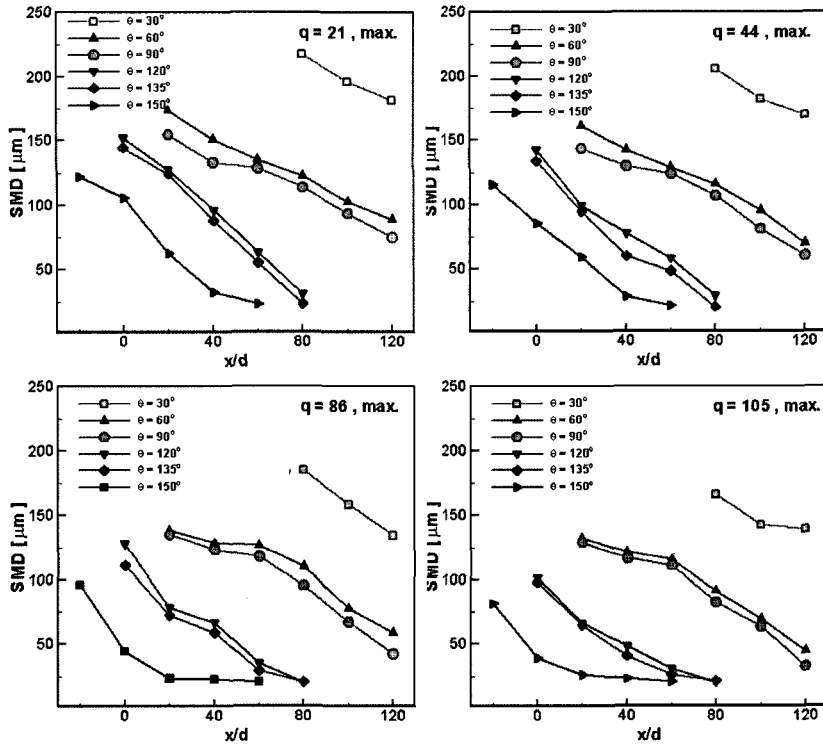


Fig. 8 SMD results of each injection angled effect using a direct photography technic

Figure 8은 직접촬영기법을 이용하여 얻은 분사각도에 대한 SMD결과 그래프이다. 마찬가지로 모든 분무각도의 결과에서 연료/공기 모멘텀 비율이 커지면 커질수록 분사속도가 증가하여 발생하는 난류효과에 의해 액적의 크기가 작아지며, 오리피스 출구를 중심으로 후류로 진행할수록 액적의 이차분열에 의해 액적의 크기가 점점 작아짐을 확인할 수 있다. 분무각도가 30°의 저각분무의 경우에는 횡단류의 공기의 영향을 받지 않는 비공기역학 영향(non-aerodynamic effect)으로 액적의 크기가 150~200 μm정도의 다소 큰 액적이 존재하며, 횡단류에 역방향으로 분사되는 150°의 경우에는 공기역학적(aerodynamic effect) 힘에 의해 액적들이 굉장히 작아 미립화가 상대적으로 유리함을 확인할 수 있다. 분사각도가 유사한 60°와 90° 결과에서 비교하여 보면 90° 경우에서가 공기유동장에 수직으로 분사되는 성질에 의해 공기유동에 의해서 더 작게 분열되어 미립화되는 성질이 있음을 확인할 수 있었는데 그 차이의 오차가 매우 작음을 알 수 있었고, 120°와 135° 같은 대향 분사에서 135°의 분사 경우가 미립화가 좋지만 그 차이의 오차가 적음을 확인할 수 있었다. 하지만 30°와

150° 같이 상반되는 일반분사와 대향분사의 경우를 비교하면 미립화의 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 분사각도가 커지면 커질수록 SMD는 작아짐을 알 수 있었고, 분사각도가 유사한 경우에는 액적들이 비슷함을 확인할 수 있다. 이로서 SMD가 공기와 연료의 We, Re, 분사각도에 따른 함수임을 실험하였고, 후에 추가연구로 함수를 도출할 필요가 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 수직분사제트의 액적크기특성에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 실험을 통하여 액적은 연료분사 속도, x축, y축 방향 대 인젝터 출구 지름 (x/d, y/d)와 제트 위치의 변수임을 확인 하였다.
- 2) 고 확대비 사진촬영으로 얻은 SMD값으로 형광신호 및 산란신호의 비율에 따른 액적 관계식의 상수 값을 도출하여 각각의 영역에서 SMD분포를 얻을 수 있었다.

3) 평면레이저유도형광 실험의 SMD분포의 결과, 조건이 일치한 상태에서 캐비테이션이 발생하게 되면 정상유동의 경우보다 난류강도의 증가로 인하여 끝음현상이 발생 하게 되고 이로서 액적이 상대적으로 작아짐을 확인 할 수 있었다.

4) 수력튀김 현상이 발생하면 정상유동에서의 경우보다 유효지름이 77%가 감소하여 유량이 68%정도 배출하게 되어 상대적으로 액적이 작아짐을 확인 할 수 있었다.

5) 분사각도에 의한 액적특성의 결과로 분무각도가 30°의 저각의 분무의 경우에는 비 공기역학적 힘의 영향(non-aerodynamic effect)으로 액적의 크기가 큰 액적이 존재하며, 횡단류에 역방향으로 분사되는 150°의 경우에는 공기역학적(aerodynamic effect) 힘에 의해 액적들이 굉장히 작아 미립화가 유리함을 확인 할 수 있다. 또한 분사각도가 커질 수록 액적크기는 작아짐을 알 수 있었고, 분사각도가 유사한 경우에는 액적의 크기가 서로 비슷함을 확인 할 수 있다. 이로서 대향분사의 경우가 분사각도가 90° 아래인 일반분사의 경우에서 동일조건에서 미립화 성능이 우수한 것을 확인 할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 과제 연구지원을 받아 연구 수행되었기에 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Schetz, J. A. and Padhye, A., "Penetration and Breakup of Liquids in Subsonic Airstreams", AIAA Journal, 15,

1385-1390, 1977.

- (2) Fric, T. F. and Roshko, A. "Vortical structure in the wake of a transverse jet.", J. Fluid Mech. 279, 1-47., 1994.
- (3) Adelberg, M., "Mean Drop Size Resulting from the Injection of a Liquid Jet into a High-speed Gas Stream", AIAA J., vol. 6, no. 6, June 1968, pp. 1143-1 147.
- (4) Ingebo, R. D., "Effect of Airstream Velocity on Mean Drop Diameters of Water Sprays Produced by Pressure and Air Atomizing Nozzles", NASA TM-73740, 1977.
- (5) K. D. Kihm, G. M. Lyn, S.Y. Son, "Atomization of Cross-Injecting Sprays into Convective Air Stream", Atomization and Spray, vol. 5, pp. 417-433, 1995.
- (6) Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Najad, A. S., "Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows", Journal of Propulsion and Power, Vol.14, No.2, pp.173-182, 1998.
- (7) S. V. Sankar, K. E. Maher, D. M. Robert, W. D. Bachalo "Spray Characterization Using a Planar Droplet Sizing Technique", ICLASS-97, August 18-22, 1997, Seoul.
- (8) Tamaki, N, Shimizu, M, Nishida, K, and Hiroyasu, H, "Effects of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet", Atomization and Sprays, Vol.8, pp.179-197, 1998.
- (9) K. Ahn, J. Kim, Y. Yoon, "Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows: Cavitation and Hydraulic Flip", Atomization and Sprays, Vol.16, No.1, 2006.
- (10) Lefebvre. A. H., Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Corp. Philadelphia, 1989.
- (11) 임병직, 고압환경에서 충돌분사 인젝터의 분무 미립화에 대한 실험적 연구, 서울대학교, 공학석사학위논문, 2003.