

## 수직분사제트의 액적영역 분무특성에 대한 연구

송진관\* · 안규복\*\* · 오정석\* · 윤영빈†

### Spray Plume Characteristics of Liquid Jets in Subsonic Crossflows

Jinkwan Song, Kyubok Ahn, Jeong-seog Oh and Youngbin Yoon

**Key Words:** Transverse injection(수직 분사), Spray plume region(액적 영역), Cavitation(캐비테이션, Hydraulic flip effect(수력튀김 현상), PLLIF(Planar liquid laser-induced fluorescence, 평면 레이저 유도 형광법).

#### Abstract

The effect of internal liquid flow on spray plume characteristics was performed experimentally in subsonic crossflows. The injector internal flow was classified as three modes such as a normal, cavitation, and hydraulic flip. The objectives of the research are to investigate the effect of internal liquid flow on the spray plume characteristics and compare the trajectory of spray plume with previous works. The results suggest that the trajectory and width of spray plume can be correlated as a function of liquid/air momentum flux ratio( $q$ ), injector diameter and normalized distance from the injector exit( $x/d$ ). It's also found that the injector internal turbulence influences the spray plume characteristics significantly.

#### 기호설명

$C_d$  : 송출 계수  
 $d$  : 오리피스의 지름  
 $L$  : 오리피스의 길이  
 $q$  : 연료/공기모멘텀플럭스비  $\rho_f v_f^2 / \rho_a v_a^2$   
 $y_i$  : 분무 분포의 최대 침투 높이  
 $y_m$  : 분무 분포의 최대 유량 높이  
 $y_b$  : 분무 분포의 하단 침투높이  
 $z_w$  : 분무 분포의 너비  
 $\Delta P$  : 분사 차압  $P_1 - P_2$

subscript

*cav* : 캐비테이션

*eff* : 유효값  
*non* : 비 캐비테이션  
*hyd* : 수력튀김현상

#### 1. 서 론

횡방향으로 흐르는 공기유동에 대하여 수직분사되는 액체제트 분무방법은 추진체계 특히, 터보제트 엔진의 애프터버너, 램제트, 스크램제트 연소기 등에 널리 이용되고 있다. 연료의 분무 특성은 일반적으로 엔진의 효율과 연소의 불안정성, 엔진 배출물에 밀접한 관계를 가지고 있다고 알려져 있다. 또한 연소 과정의 능동 제어를 실현하기 위해서는 분무의 시간적, 공간적 분포에 대한 명확한 규명이 필요하다. 따라서, 액체연료의 액주 분열과정, 액주에서 액적으로 전이될 때의 동특성, 액적의 분무구조에 대한 연구가 많은 연구소 및 대학, 산업체 등에서 이루어지고 있는 상태이다<sup>(2)</sup>.

횡방향의 공기유동에 대하여 수직으로 분사된 연료의 분무 구조는 세 영역으로 구분할 수 있다. 초기 분사 직후 인젝터 노즐 형상을 그대로 유지하는 액주 영역(liquid

(2006년 5월 18일 접수 ~ 2006년 6월 8일 심사완료)

\*서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\*한국항공우주연구원

†책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)872-8032

column region), 분열이 시작되어 큰 액적이 존재하는 영역(ligament region), 미립화된 액적으로 이루어진 액적 영역(spray plume region)으로 나눌 수 있다. Schetz 등<sup>(1)</sup>이 공기흐름 방향과 공기흐름 반대방향의 유동을 구분하고, 공기흐름 반대방향의 액주표면과는 공력학적 항력에 기인한 액주의 가속에 의하여 발생함을 밝혔다. Wu 등은 액주와의 형성에 의한 액주 분열과 그와 별도로 액주 주변에서 직접 분열하는 표면 분열을 정의하였으며, 액주 분열의 분열점 위치와 분열 전까지의 관계식을 제안하였다<sup>(2)</sup>. 또한 액적 영역의 분무 구조 분석을 시행하고, 그에 대한 특성 관계식을 제안하였다<sup>(3)</sup>. 그러나 Schetz 등<sup>(1)</sup>, Wu 등<sup>(2,3)</sup>의 연구는 캐비테이션(cavitation)이나 수력튀김 현상 등의 내부 유동 교란 요인을 배제하고 정상유동일 때의 유동에 대하여 연구한 결과이다.

하지만 Tamaki 등<sup>(4)</sup>의 결과에서 캐비테이션 현상은 분열렉橋 특성에 큰 영향을 주는 것으로 보고되었다. 캐비테이션 현상은 유입구의 곡률 이 오리피스 지름의 0.14배 보다 크면 발생하지 않음이 알려져 있으나, 실제 기계 가공에서는 “Blind Drilled”을 하는 경우가 많을 뿐 아니라, 연료 탱크가 고압으로 유지된다면 이질 핵화 등의 여타 인자로 인하여 항상 캐비테이션이 발생할 가능성을 지니게 된다<sup>(5)</sup>. 그에 따라 Ahn 등<sup>(6)</sup>은 캐비테이션과 수력튀김 현상(hydraulic flip)이 액주 분열 과정에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하고, 각 현상에 대한 유효 지름( $d_{eff}$ ), 유효 속도( $v_{eff}$ )에 대한 도입을 설명하였다.

본 연구에서는 캐비테이션이나 수력튀김 현상 등의 비정상 유동 현상으로 인해 수직 제트의 액주 분열 이후 액적 영역에서의  $d_{eff}$ ,  $v_{eff}$ 에 대한 고찰을 수행하고, 액적 영역의 분무 구조에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 인젝터

인젝터는 오리피스 내부의 유동을 관찰하기 위하여, 아크릴 소재로 제작하였으며 투명도를 높이는 표면처리를 하였다(Fig. 1(a)). 인젝터 내부는 오리피스와 챔버로 이루어졌다. 오리피스의 지름( $d$ )은 0.5 mm이며, 챔버의 지름( $D$ )은 12 mm로 이다. 캐비테이션이 발생하는 유동과 발생하지 않는 유동은 유입구의 곡률에 의해 결정되므로 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

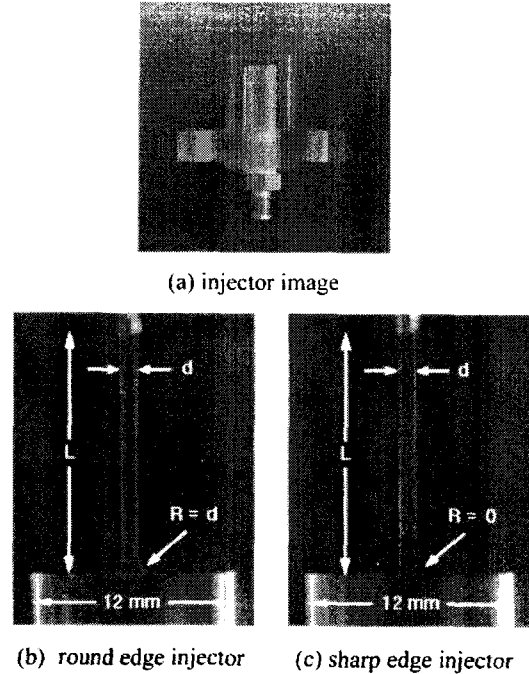


Fig. 1 Photographs of injectors

로 하였는데 일 경우 베나 콘트랙타(vena contracta)가 형성되지 않아 캐비테이션이 발생하지 않는다. 곡률이 없는 인젝터는 오리피스 길이( $L$ ) 대 지름비( $L/d$ )가 5, 20인 인젝터 두 가지를 실험하였다. 일반적으로  $L/d \leq 8$ 인 경우 수력튀김현상이 발생한다고 알려져 있으며, 캐비테이션과 수력튀김 현상을 확인하기 위하여  $L/d$ 를 각각 다르게 구성하였다(Fig. 1(b)).

### 2.2 실험장치 및 방법

실험은 모두 세 단계로 수행되었다. 우선 캐비테이션에 의한 유량 변화의 경향을 알아보고 수직 분사시 제트의 액체/기체 모멘텀 플럭스 비( $q$ )를 구하기 위하여 각 인젝터의 유량 측정 시험을 수행하였다. 접사촬영 기구를 장착한 디지털 카메라(Canon EOS-D30)와 스트로보 스크로프를 이용하여 인젝터 내부 유동과 내부 유동 현상에 따른 외부 제트의 특징을 관찰하였다. 그리고 위 두 실험을 통하여 파악된 유동 현상을 기준으로 PLLIF (Planar Liquid Laser Induced Fluorescence) 기법을 이용하여 분무 구조를 관찰하였다. Fig. 2는 개략적으로 나타낸 PLLIF 실험의 장치 그림이다. PLLIF 실험을 수행하기 위하여 불과 에탄올을 4대 1로 섞고 Aldrich F245-6 형광 염료를 섞은 실험 연료를 사용하였다. 가시화 영역(test section)의 크기는

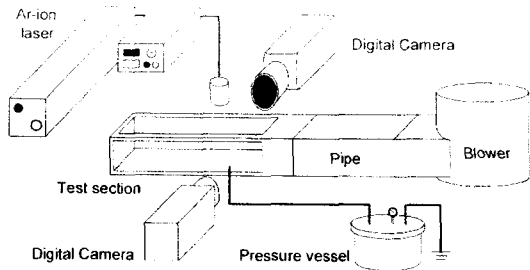


Fig. 2 Experimental Setup for PLLIF (Planar Liquid Laser Induced Fluorescence)

Table 1 Experimental Condition

Parameter	Value
Air velocity	60 m/s
Air temperature	300 K
Fuel temperature	318 K(45°C)
Orifice Diameter	0.5 mm
Orifice Shap	Round edged (L/d=20), Sharp edged (L/d=5, 20)
DP(bar)	1, 2, 3, 4, 5, 6
x/d	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180

50 mm×50 mm×330 mm 이며, 20마력 송풍기를 사용하여 공기를 불어넣어 주었다. PLLIF 실험을 위한 레이저는 Spectra-Physics의 아르곤-이온 레이저이며, 실험 결과치를 얻기 위하여 550 nm 하이패스 필터와 514±5 nm 밴드패스 필터를 각각 장착한 디지털 카메라(Canon EOS D30)를 사용하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 유량계수

Fig. 3은 분사압력 차이를 1 bar부터 6 bar 까지 0.5 bar 씩 증가하며 각각 인젝터의 유량을 측정하고 그 결과를 이용하여 유량 계수(Discharge coefficient:  $C_d$ )를 구하여 그린 그래프이다. 캐비테이션 현상이 잘 발생하도록 만들기 위하여 실험 연료를 45°C로 상승시켜 측정하였다. 어떠한 내부 유동의 교란이 없는 경우(Round, L/d=20), 분사차압이 낮은 경우에는 내부 벽면과의 마찰 등의 원인으로 상당한 유량 손실이 발생하여 작은 유량계수를 가지게 된다. 그러나 분사차압이 커질수록 유량손실이 작아지는데, 이는 레이놀즈수에 선형적으로 증가한다는 사실과 일치

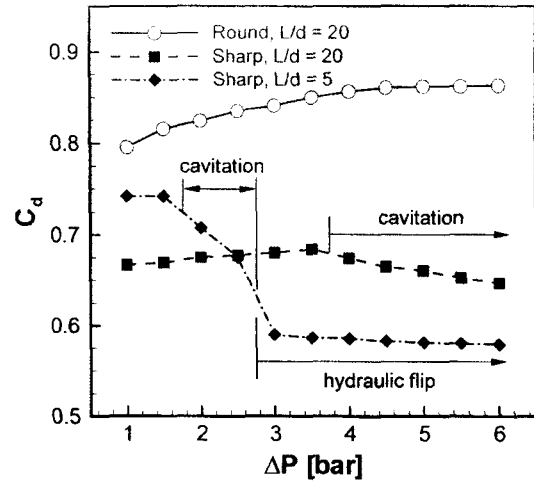


Fig. 3 Discharge Coefficient of orifice d=0.5 mm as a function of injection pressure difference

한다<sup>7)</sup>. 그에 반하여 유입구에 곡률가공이 되어있지 않고, L/d=20인 인젝터인 경우, 캐비테이션이 발생하기 전까지는 유량계수가 서서히 증가하는 양상으로 보여주나, 캐비테이션이 발생하는 경우 서서히 유량계수가 감소하는 결과를 보여주었다. 유입구에 곡률가공이 되어있지 않고, L/d=5인 인젝터인 경우 세 가지의 유동변화가 확인되었다. 인젝터의 내부유동은 분사차압이 1.5 bar를 기준으로 캐비테이션으로 전이되었고, 3 bar를 기준으로 수력튀김 현상을 보이는 유동으로 전이되었다. 캐비테이션이 발생하게 되면, L/d=20인 인젝터의 경우와 비슷하게 유량계수가 급격히 감소되는 양상을 보이게 된다. 그러나 수력튀김 현상이 발생하게 되면 유량계수가 분사차압과는 무관하게 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 배나 컨트랙타가 발전하여 유로와 유동이 분리됨에 의하여 유로 변화에 의한 영향과 분사차압의 영향이 합쳐져서 유량계수가 일정하게 유지되기 때문으로 파악된다.

#### 3.2 오리피스 내외부 유동 분석

유량계수 측정을 통하여 캐비테이션 현상과 수력튀김 현상이 발생함을 예측할 수 있었다. 유량계수 측정에서 파악된 결과와 실제 인젝터 내부와 외부의 현상을 비교하기 위해서 직접사진 촬영을 수행하였다. Fig. 4은 압력 증가에 따른 인젝터의 내부유동과 외부 제트유동을 촬영한 사진을 정렬한 그림이다. 유입구에 곡률이 있는 인젝터의 경우, 분사차압이 증가하여도 내부유동에는 아무런 유동 교란 현상이 발생하지 않았다. 외부 제트 유동은 분사차압이 커질수록 레이놀즈수가 커지게 되고, 그에 따라 난류강도

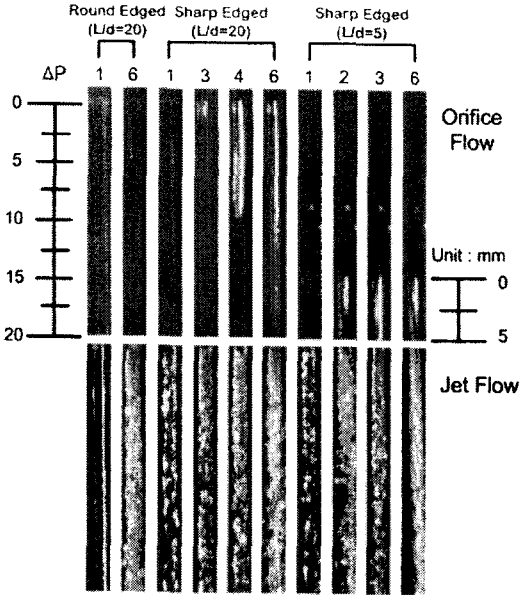


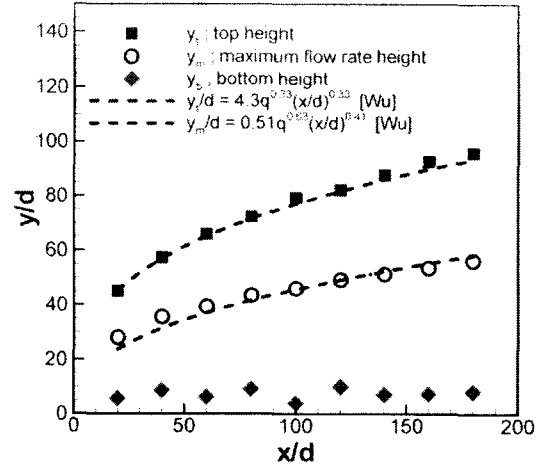
Fig. 4 Internal and external flows of 0.5mm orifices

가 강해지는 것을 하안 포말을 통하여 확인할 수 있다. 유입구에 가공이 되지 않고,  $L/d=20$  인 인젝터인 경우에는 캐비테이션이 발생하기 전에는 곡물가공이 이루어진 인젝터와 마찬가지로 어떠한 교란도 확인되지 않으나, 캐비테이션이 발생하게 되면 내부에 하안 포말이 신장, 수축하는 것이 확인할 수 있으며, 제트 유동 역시 심한 유동의 굴곡짐을 볼 수 있다. 이는 캐비테이션에 의하여 심한 내부 유동 교란이 발생하고 있음을 말해준다. 유입구에 곡물가공이 되어있지 않고,  $L/d=5$ 인 인젝터인 경우, 유량계수 측정의 결과와 동일하게 세가지의 유동 변화를 확인할 수 있다. 분사차압이 1 bar일 때는 정상유동의 양상을 보이지만, 2 bar가 되면 캐비테이션이 발생한 유동의 현상을 보여준다. 그런데 3 bar보다 커지게 되면, 캐비테이션이 수력퇴김현상으로 발전하게 되면서 내부 유동은 투명한 관의 형상을 보이게 되고, 제트 유동은 제트의 지름이 정상유동보다 작아짐이 확인되고, 유동의 형상은 정상유동의 형상과 비슷함을 확인하였다.

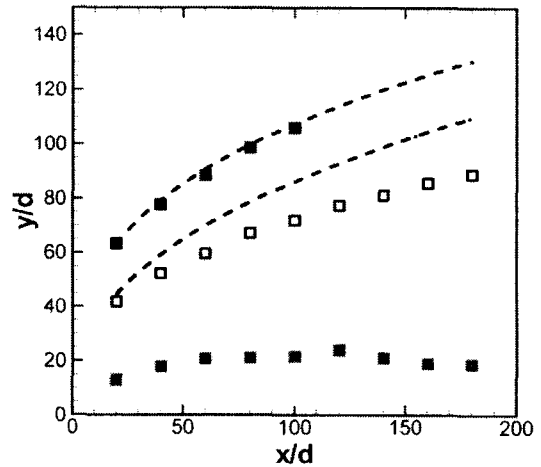
### 3.3 정상 유동에 대한 관계식

Fig. 5는 본 연구에서 비교 기준으로 삼은 Wu 등<sup>(3)</sup>에 제안된 아래 두 식을 도입하여 정상 유동일 경우의 실험 결과와 비교한 것이다.

$$y_t/d = 4.3q^{0.33}(x/d)^{0.33} \quad (1)$$



(a)  $\Delta P= 2\text{bar} ; q = 62.5$



(b)  $\Delta P= 5\text{bar} ; q = 171.9$

Fig. 5 Comparison with Wu et al.(3)'s results

$$y_m/d = 0.51q^{0.63}(x/d)^{0.41} \quad (2)$$

Fig. 5(a)의 그래프는 곡물이 있는 인젝터의 경우로 Wu 등<sup>(3)</sup>이 진행한 실험과 같은 조건으로 진행한 결과이며, Fig. 5(b)는 Wu의 실험 조건과 다른 조건에서의 결과이다. Wu 등<sup>(3)</sup>은 공기/연료 모멘텀 비  $q=5.3-59.1$ 에서 실험하여 식 (1), (2)를 도입하였다 그래서 Fig. 5(a)에서는 그와 비슷한 조건인  $\Delta P=2 \text{ bar}(q=62.9)$  일 경우의 실험 결과와 비교하였다. 분무 구조의 가장 높은 부분의 높이를  $y_t$ , 최대 질유량이 지나가는 높이를  $y_m$ , 가장 낮은 부분의 높이를  $z_w$ , 진행방향과 높이 방향에 대해 수직인 방향의 길이를  $x$ 로 정의하고 결과에 대한 분석을 하였다. 분사차압이 2

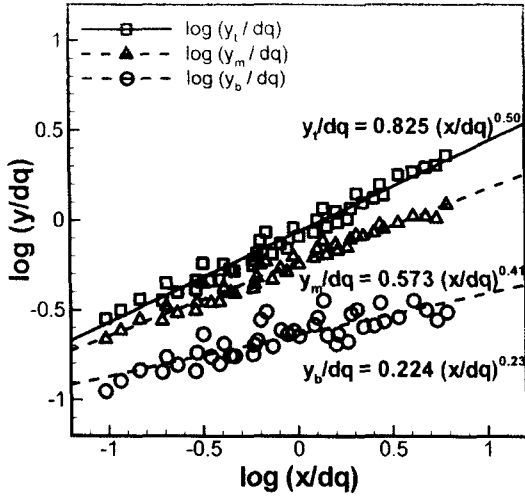


Fig. 6 Spray plume trajectory at steady flow : penetration correlations

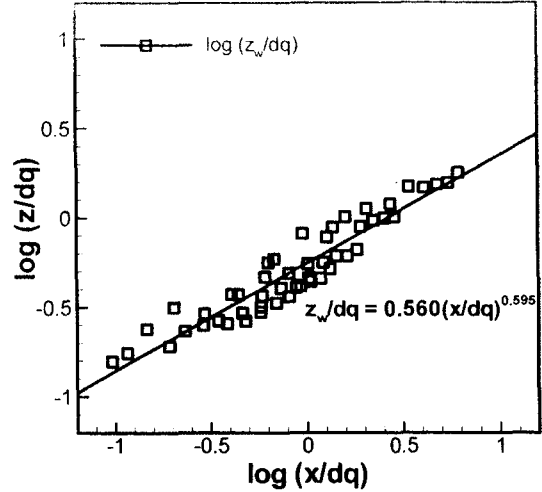


Fig. 7 Spray plume trajectory at steady flow : width correlation

bar인 경우에는 가장 높은 부분의 높이와 최대 질유량이 지나가는 높이 에 대한 실험치가 잘 맞는 모습을 보여준다. 하지만 분사차압이 5 bar, 즉  $q=171.9$ 에서의 실험 결과(Fig. 5(b))를 비교해 보면  $y_b$ 는 대체로 맞지만,  $y_m$ 는 상당히 맞지 않는다.

경향을 보여준다. 따라서 실험 결과를 바탕으로 새로운 관계식을 도입하였다.

$$y_t/dq = 0.825(x/dq)^{0.50} \quad (4)$$

$$y_m/dq = 0.573(x/dq)^{0.41} \quad (5)$$

$$y_b/dq = 0.224(x/dq)^{0.23} \quad (6)$$

$$z_w/dq = 0.560(x/dq)^{0.595} \quad (7)$$

위 식 (4), (5), (6), (7)은 Wu 등의 논문에서 유도되었던 이론적인 분석의 관계식 꼴인 식(8)과 동일하며,

$$\frac{y}{dq} = C \left[ \frac{x}{dq} \right]^n \quad (8)$$

$$y/dq = 1.297(x/dq)^{0.509} \quad (9)$$

$$y_t/d = 1.37\sqrt{q(x/d)} \quad (10)$$

Wu 등<sup>(3)</sup>과 Ahn 등<sup>(6)</sup>의 경향성과도 동일한 양상을 보여준다. 위 관계식에 대하여 기존 연구결과와 비교해 보면, 액주 영역에 대한 관계식인 식 (9), (10)와 계수만 차이가 나는 동일한 형태의 식임을 알 수 있다. 이는 Wu 등<sup>(2,3)</sup>이 액주, 액적의 형상 차이에 대한 항력 계수 차이라는 해석

Table 2 Difference between  $q^{0.37}$  and  $q^{0.41}$  as  $q$  increases

	$q^{0.37}$	$q^{0.41}$
$q = 5.3$ (Wu 등)	1.853	1.981
$q = 59.1$ (Wu 등)	4.524	5.325
$q = 62.5$ ( $\Delta P = 2\text{bar}$ )	4.618	5.449
$q = 171.9$ ( $\Delta P = 5\text{bar}$ )	6.715	8.250

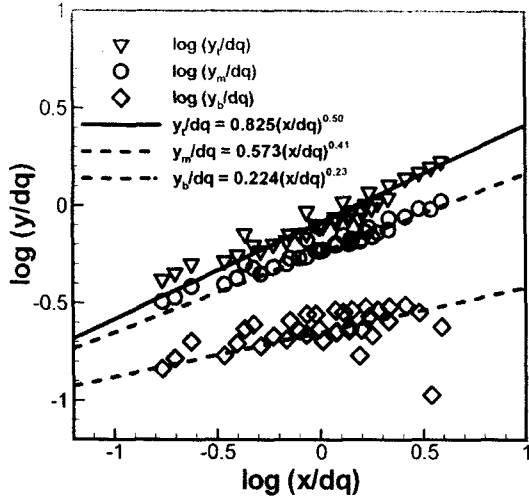
과 일치한다.

또한 최대 질유량 높이  $y_m$ 의 식 역시  $x/d$ 에 대한 차수는 같고 앞의 계수도 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 다만 공기/연료 모멘텀 플럭스 비가 각각 0.37과 0.41로 다른데, 이 차이가 공기/연료 모멘텀 플럭스 비가 커질수록 큰 차이를 보임을 Table 2에서 보여준다.

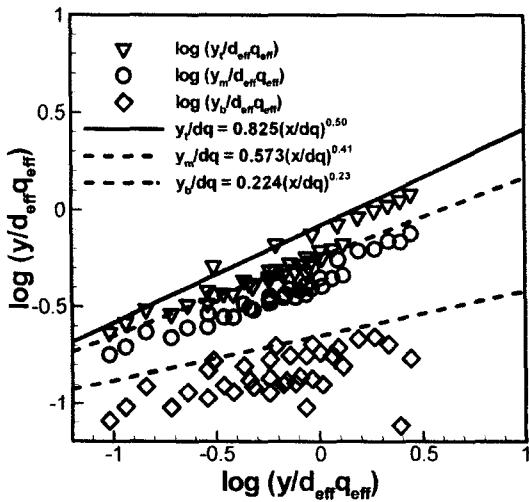
같은 방법으로 분부의 너비  $z_w$ 는 식 (7)로 표현할 수 있다(Fig. 7). 이는 Wu 등<sup>(3)</sup>의 논문에서는 분사 면적 대비 분부의 면적으로 너비를 정의한 것과 달리 침투거리와 동일한 방법으로 너비의 크기를 측정하여 정상 유동의 너비에 대한 관계식을 도출하였다.

### 3.4 캐비테이션 유동에 대한 분석

Fig. 8은 캐비테이션이 발생한 경우에 대하여 식 (4), (5), (6)를 로그 척도로 변환한 식에 비교한 그림이다. 이러한 액주 분열 이후의 결과는 Ahn 등<sup>(6)</sup>의 액주 분열 전의 캐비테이션이 발생한 경우에 대한 분석과 동일하게 분석을 시행하였다. 유효 파라미터는 캐비테이션 유동에 대해서 일반적으로 많이 사용되고 있는 Schmidt 등<sup>(8)</sup>의 식



(a) using  $d$  and  $q$



(b) using  $d_{eff}$  and  $q_{eff}$

Fig. 8 Penetration correlations at cavitation flow

(11), (12)를 차용하였다. 공칭 파라미터와 유효 파라미터를 사용하여 분석을 해 본 결과 공칭 파라미터  $d$ 와  $p$ 를 그대로 사용하되 계수값을 조정하는 것이 타당한 것으로 생각된다.

$$u_{eff} = \frac{2C_c(P_1 - P_v) - (P_2 - P_v)}{C_c \sqrt{2\rho_l(P_1 - P_v)}} \quad (11)$$

$$A_{eff} = \frac{2C_c^2(P_1 - P_v)}{2C_c(P_1 - P_v) - (P_2 - P_v)} A \quad (12)$$

이러한 결과는 너비에 대한 결과도 동일한 결과를 보여 주고 있다(Fig. 9). 이는 캐비테이션이 발생하게 되더라도

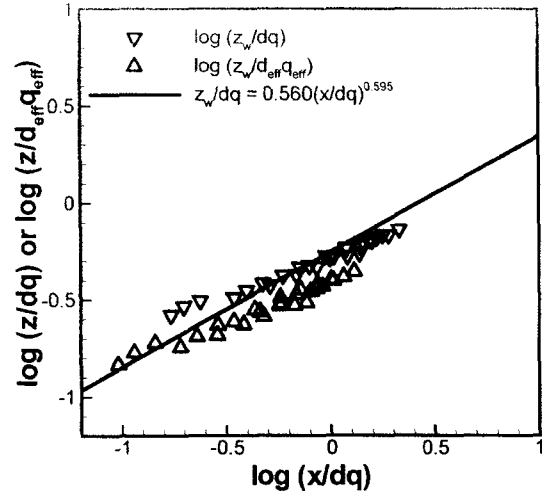


Fig. 9 Width correlation at cavitation flow

오리피스 출구에서는 다시 유체로 채워져서 유체 제트의 지름이 인젝터의 지름과 동일해지고, 마찬가지로 속도 역시 면적 대한 속도로 바뀌게 됨을 의미한다. 바꾸어 말하면,  $d_{eff,cav} \approx d, q_{eff,cav} \approx q$  라고 생각할 수 있다.

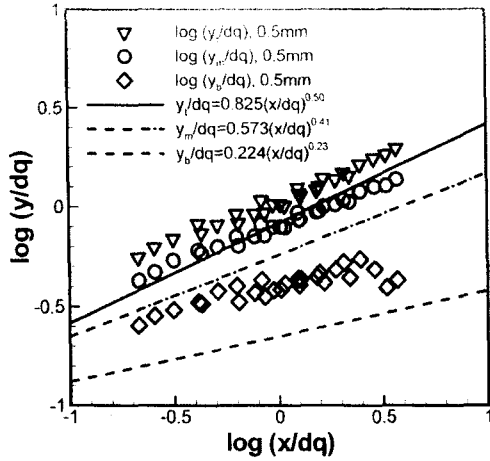
### 3.5 수력튀김현상에 대한 분석

수력튀김현상이 발생할 경우에는 캐비테이션이 발생한 경우에 비해 다른 결과가 도출되었다.

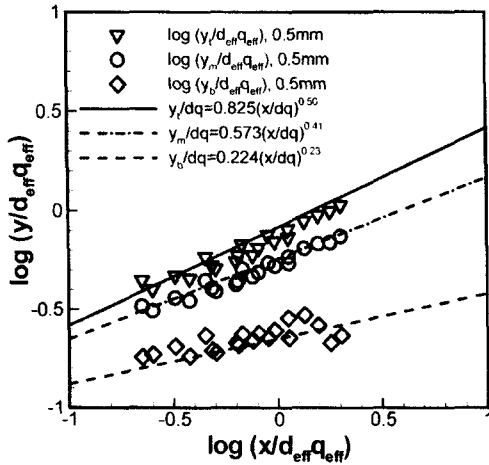
수력튀김현상에 대한 분석 역시 Ahn 등<sup>(4)</sup>에서 제시된 수력튀김 현상이 발생하였을 때 액주 분열 이전의 현상을 분석한 방법과 동일하게 진행하였다. Fig. 10(a)에서 도시한 결과는  $d$ 과  $q$ 를 그대로 사용하여 구한 것이고, Fig. 10(b), (c)에서 도시한 결과는 Schmidt 등<sup>(8)</sup>과 Ahn 등<sup>(6)</sup>에 있는,  $d_{eff,hvd}$ ,  $q_{eff,hvd}$ 를 이용한  $q_{eff,hvd}$ 를 사용한 것이다. 결과적으로  $d_{eff,hvd}$ 과  $q_{eff,hvd}$ 를 사용한 결과가 식 (4), (5), (6)에 부합한다는 Ahn 등<sup>(6)</sup>의 결론과 동일함을 보여준다. 하지만 각각의 식 모두 조금씩 차이를 보여준다. 따라서 향후 유효 파라미터를 정확하게 표현하는 식을 구할 예정이다.

Fig. 11은 수력튀김현상이 발생하였을 경우 너비의 실험결과에 대한 그림이다. 침투거리와 마찬가지로 너비 역시 유효 파라미터를 사용한 경우 더 잘 맞음을 보여준다. 이러한 두 그림의 결과는 유체 제트의 지름이 수력튀김현상에 의하여 실제 인젝터의 공칭 지름보다 작아졌고, 그에 따라 작아진 지름에 대한 속도로 바뀌기 때문에 유효파라미터를 적용할 필요성이 있음을 의미한다.

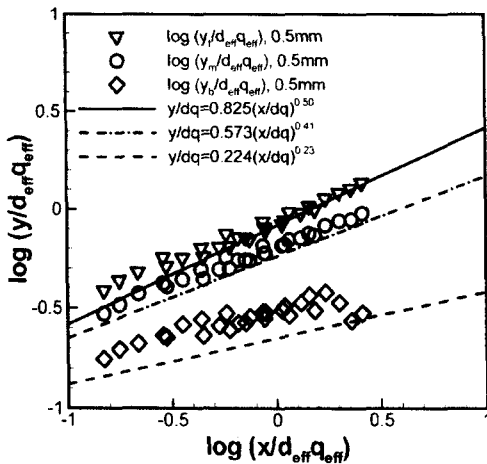
캐비테이션이 발생하였을 때의 결과와 수력튀김 현상이 발생하였을 때의 결과가 완전히 다른 것은, 분무 현상



(a) using d and q



(b) using  $d_{eff}$  and  $q_{eff}$  : Schmidt et al.<sup>(6)</sup>



(c) using d and q : Ahn et al.<sup>(5)</sup>

Fig. 10 Penetration correlations at hydraulic flip flow

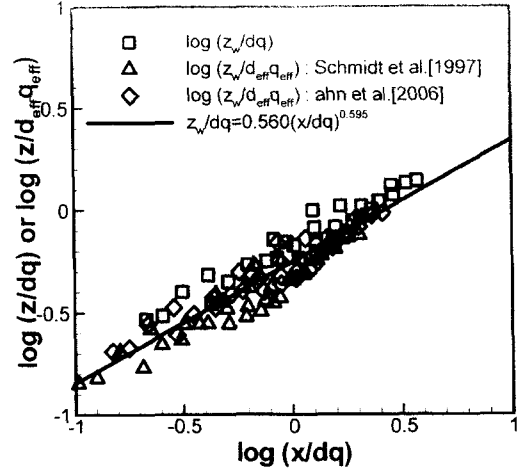


Fig. 11 Width correlations at hydraulic flip flow

이 그 현상이 발생하였을 때의 출구지름과 그에 해당하는 속도에 지배받음을 의미한다.

#### 4. 결 론

수직분사제트의 액적영역 분무특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 정상 유동일 경우의 액적영역에 대한 분무의 주요 파라미터  $y_s, y_m, y_b, z_w$ 는 x축 방향 대 인젝터 지름비( $x/d$ )와 모멘텀 플럭스 비( $q$ )에 대한 관계식으로 도출할 수 있다.
- 2) 오리피스 내부에서 캐비테이션이 발생한 유동의 경우 정상 유동에 대하여 도출해낸 관계식에 대하여 공칭 지름  $d$ 와 공기/연료 모멘텀 플럭스 비( $q$ )를 사용하면 잘 맞음이 확인되었다.
- 3) 오리피스 내부에서 수력퇴김 현상이 발생한 유동의 경우 정상 유동에 대하여 도출해낸 관계식에 대하여 유효 지름  $d_{eff}$ 와 유효 공기/연료 모멘텀 플럭스 비( $q_{eff}$ )를 사용하면 실험결과와 잘 맞는 실험실을 도출할 수 있음이 확인되었다.
- 4) 액적 영역의 캐직은 출구에서의 액주 지름과 액주의 출구 속도에 대한 모멘텀 플럭스 비에 의하여 결정된다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Schetz J.A. and Padhye. A., "Penetration and Breakup of Liquids in Subsonic Airstreams", AIAA Journal, 15(10), 1977, pp. 1385~1390.
- (2) Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Najad, A. S., "Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows", Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 1, 1997, pp.64~73.
- (3) 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, 1998, pp.173~182.
- (4) 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, 1998, pp.179~197.
- (5) Nurick, W. H., "Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing", Journal of Fluids Engineering, 1976, pp. 681~687.
- (6) Ahn, K., Kim. J. and Yoon.Y., "Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows: Cavitation and Hydraulic Flip", will be published in Atomization and Sprays, Vol. 16, No. 1, 2006.
- (7) Lefebvre, A. H., "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corp. Philadelphia, 1989.
- (8) Schmidt, D. P. and Corradini. M. L., "Analytical Prediction of the exit flow of cavitating orifices", Atomization and Sprays, 7(6), 1997, pp. 603~616.