

## 오리피스 내부 유동조건에 따른 수직분사제트의 분열특성에 대한 연구

안규복\* · 김정훈\* · 윤영빈\*

### Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows: Cavitation and Hydraulic Flip

Kyubok Ahn\* · Junghoon Kim\* · Youngbin Yoon\*

#### ABSTRACT ④

In this research, we focused on the effects of the orifice internal flow such as cavitation and hydraulic flip. The breakup characteristics such as the breakup length and trajectory were measured by changing the orifice diameter ( $d$ ), the orifice length/orifice diameter ( $L/d$ ), the injection pressure and the shapes (sharp and round) of orifice entrance to provide a lot of conditions of the orifice internal flow. It is found that cavitation bubbles that occur inside the sharp-edged orifice make the liquid jet ejecting from the orifice turbulent. In the orifices ( $L/d = 5$ ), the hydraulic flip phenomenon is shown when the injection pressure is high. In case cavitation occurs it breaks up more earlier than that in case of non-cavitation. In case hydraulic flip occurs, since the area of the liquid jet becomes small, the breakup length is also small as that in case of cavitation. But the liquid column trajectories have a similar tendency irrespective of cavitation.

#### 초 록

본 연구에서는 인젝터 형상에 따른 캐비테이션과 같은 유동 현상이 수직 분사된 액체 제트의 분열에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 오리피스의 지름과 길이대 지름비( $L/d$ ) 및 입구의 형상이 다른 인젝터에서 압력을 변화시켜가며 내부 유동 변화를 살피고 수직분사 시 액주의 분열 거리와 궤적을 구하여 기존의 연구 결과와 비교하고 분석하였다. 실험 결과 곡률이 없는 경우(sharp edged)의 오리피스에서는 어느 정도 이상의 압력에서 모두 캐비테이션이 발생하였고 곡률이 없는 경우 중 길이대 지름비가 작은 오리피스에선 더 높은 압력에서 캐비테이션 성장에 의한 수력튀김(hydraulic flip)현상도 관찰할 수 있었다. 수직분사 시 곡률이 있는 경우와 없는 경우 모두 동일한 모멘텀 플럭스 비( $q$ )에 대해 거의 같은 궤적 형상을 보였으나 캐비테이션이 일어날 경우 교란에 의해 액주의 분열 거리는 감소하였고 수력튀김 또한 제트 단면적의 감소 및 제트의 확산으로 분열거리가 감소하였다.

#### 1. 서 론

횡방향의 공기유동에 수직으로 분사하는 액체

제트의 분무는 제트 엔진의 후연소기, 램제트, 스크램제트 등의 연소기에 이용되고 있어 오래

\* 서울대학교 기계항공공학부

전부터 중요한 연구 대상이 되어왔다. 이들 연소기의 연소 효율은 분사된 액체 제트의 미립화 특성에 지대한 영향을 받게 되므로 실험뿐만 아니라 이론적으로도 상당한 연구가 진행되어왔다.[1]

Wu 등[1]은 액주파의 형성에 의한 액주의 분열(column breakup)과는 별도로 액주 주변에서 액적이 직접 떨어져 형성되는 것을 관찰하였고 이를 표면 분열(surface breakup)로 정의하였다. 이 두 가지 미립화 과정 중 전자가 지배적인 과정이며 후자는 공기 유동과 분사된 제트의 모멘텀 비(momentum ratio,  $q$ )가 클수록 잘 일어난다.

한편 인젝터 내부 형상의 차이는 오리피스 내부 유동특성에 변화를 주게 되는데 흔하게 발생할 수 있는 대표적인 현상이 바로 캐비테이션(cavitation)이다. 본 연구에서는 인젝터 형상에 따른 캐비테이션과 같은 유동 현상이 수직 분사된 액체 제트에서 액주의 분열위치와 궤적과 같은 분열 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 인젝터(Injector)

Fig. 1은 실험에 사용한 인젝터이다. 인젝터는 내부 오리피스 유동을 관찰하기 위하여 아크릴을 소재로 제작하였으며 투명도를 높이는 표면처리를 하였다. 인젝터 내부는 오리피스와 챔버로 이루어졌다. 오리피스는 지름이  $d=0.5$  mm, 1.0 mm 두 가지 경우로 하여 지름의 차이에 의한 영향을 알아보기 위하여 챔버의 지름은 12cm로 각각  $D/d=12$ , 24이다. 캐비테이션이 발생하는 유동과 발생하지 않는 유동의 차이는 유입구의 곡률에 의해 결정되므로 유입구에 곡률이 없는 오리피스(sharp edged orifice)와 곡률이 있는 오리피스(round-edged orifice)를 대조군으로 설정했다. 곡률은 유입구의 반경과 오리피스의 지름이 같은  $r/d=1$ 로 하였는데  $r \geq 0.14d$ 일 경우 베나 콘트랙타(vena contracta)가 형성되지 않아 캐비테이션이 발생하지 않는다. 곡률이 없는 경우에는 길이대 지름비에도 차이를 두었는데

길이대 지름비를 각각  $L/d=5$ , 20으로 하였다.

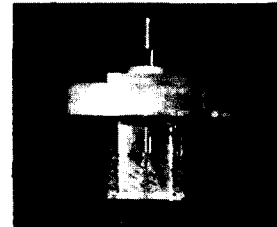


Fig. 1 Injector

### 2.2 실험방법 및 조건

실험은 세 단계로 수행이 되었다. 우선 캐비테이션에 의한 유량 변화의 경향을 알아보고 수직 분사시 제트의 모멘텀 플럭스 비를 구하기 위하여 각 인젝터의 유량 측정 시험을 수행하였다. 스트로보스코프와 접사렌즈 및 줌 렌즈 등의 접사 촬영 기구를 장착한 디지털 카메라(Canon D30)를 이용하여 인젝터 내부 유동 변화와 그에 따른 외부 제트의 특징을 관찰하였다. 횡방향 유동공기는 60 m/s로 고정하였으며 구체적인 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

Air velocity	60 m/s					
Air Temperature	300 K					
Orifice Diameter	0.5 mm			1.0 mm		
Orifice shape	Round edged	Sharp edged (L/d=20)	Sharp edged (L/d=5)	Round edged	Sharp edged (L/d=20)	Sharp edged (L/d=5)
$\Delta P$ (bar)	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4
Test Liquid	Water					
Test Section	50 mm x 50 mm x 330 mm					
Blower	20 hp					
Camera	Canon D30 (2160 x1440)					
Spark Source	Digital Stroboscope(exposure time < 10 ns)					

Table 1 Experimental condition

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 유량측정

Fig. 2는 0.5 bar씩 분사압력을 변화시켜가며 각 인젝터의 유량을 측정하고 그 결과를 이용하여 유량 계수 값(Cd)을 구해 보았다. 어느 인젝터에서나 초기에는 압력이 증가할수록 유량계수

가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 어느 압력 이상이 되면 곡률이 있는 경우 높은 유량계수로 일정해지는 경향을 보이는 반면 곡률이 없는 경우에는 압력이 증가할수록 유량계수 값이 감소하는 경향을 보인다. 곡률이 없는 경우 길이대 지름비의 차이에 따라서도 또 다른 특징을 보이는데  $L/d$ 가 20인 경우 0.5 mm에서는 4 bar 이후로 1.0 mm에서는 2.5 bar 이후로 서서히 감소하는데 비해  $L/d$ 가 5인 경우 0.5 mm와 1.0 mm 모두 1.5 bar 이후로 서서히 감소하다가 3 bar에서 갑자기 떨어지며 그 이후로 거의 일정한 유량계수 값을 보여 준다. 캐비테이션의 성장이 충분히 이루어져 수력튀김이 발생하게 되면 유량계수는 급격히 떨어지는 현상을 보이며 이후로는 일정한 값을 보이게 된다.[2, 3] 즉  $L/d$ 가 20인 오리피스에서는 캐비테이션의 성장이 이루어지고 있으며  $L/d$ 가 5인 오리피스에선 캐비테이션이 수력튀김으로까지 발달되었다.

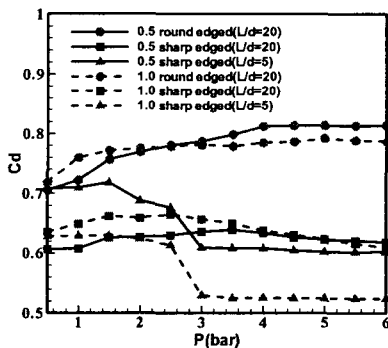


Fig. 3 Discharge coefficients as a function of injection pressure

### 3.2 오리피스 캐비테이션(Orifice cavitation)

캐비테이션의 수직분사에 대한 영향을 알아보기 위해선 오리피스 내의 캐비테이션과 그에 따른 출구에서의 제트의 변화가 어떠한지를 미리 살펴보는 것이 필요하다. Fig. 3은 1.0 mm 오리피스에서의 내부유동과 압력에 따른 출구에서의 제트 유동을 나타낸 그림이다. 곡률이 있는 오리피스에서는 어떠한  $\Delta P$ 에서도 내부유동에 캐비테이션이 발생한 것을 볼 수 없었으며 상대적으로

로 다른 출구 제트에 대해 비교적 매끄러운 편이었다.

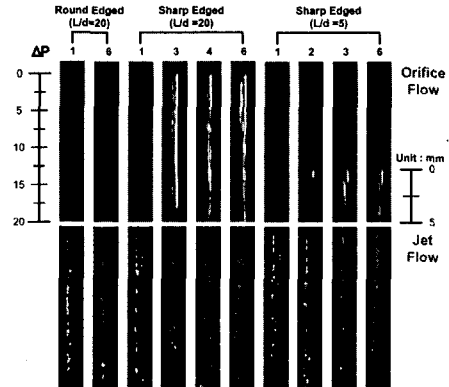


Fig. 3 Internal flows and out jets of 1.0 mm orifices

### 3.3 수직분사(Transverse injection)

#### 3.3.1 액주의 분열길이

액주의 분열길이에 관해 Wu 등[1]은 몇 가지 가정과 이론 방정식을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$x_b/d = 8.06 \quad (1)$$

본 연구에서는 이를 비교 기준으로 삼아 캐비테이션에 의한 분열길이의 감소를 알아보기 위해 모든 인젝터의 x 방향 분열길이를 구하고 이를 각각 Fig. 4에 나타내었다. 곡률이 있는 경우에는 주어진 압력 범위 내에서 이 식에 크게 벗어나지 않는 결과를 볼 수 있었다. 하지만 곡률이 없는 경우 캐비테이션이 아직 일어나지 않은 구간에서는 곡률이 있는 경우와 유사하게 나타났으나 캐비테이션이 일어나면서부터는 감소하는 결과를 보이기 시작하였으며 그 감소하는 경향은 오리피스의 지름과  $L/d$ 에 따라서도 서로 약간의 차이를 보였다.  $L/d$ 가 20인 경우, 상대적으로 캐비테이션의 성장 정도가 덜하고 굴곡진 흔들림이 적은 0.5 mm의 오리피스보다 제트가 부스스해지면서 굴곡진 흔들림이 심한 1.0 mm의 오리피스에서 크게 감소하였다.  $L/d$ 가 5인 경우에도 캐비테이션이 발생하면서 분열길이가 감소하며 비교적 교란이 적을 것으로 생각되는

수력튀김이 이후에도 더욱 감소하게 된다.

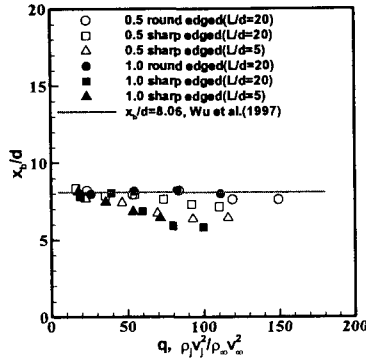


Fig. 4 X-direction breakup length

### 3.3.2 액주의 분무계적

수직분사 제트의 궤적에 대한 연구는 이미 오래전부터 많은 연구자들에 의해 이뤄져 궤적의 변화와 관계되는 인자가 모멘텀 플럭스 비( $q$ )와 분사 오리피스 지름( $d$ )의 곱으로 알려졌다. 여기서 모멘텀 플럭스 비는 다음과 같다.

$$q = \frac{\rho_j v_j^2}{\rho_c v_c^2} \quad (2)$$

Wu 등[1]은 간단한 이론 방정식과 실험을 통하여 분열되기 이전의 액주의 궤적에 대해 다음과 같은 근사식을 제안하였고 그 유효성을 검증하였다.

$$y/d = 1.37 \sqrt{(x/d)q} \quad (3)$$

Fig. 5는 서로 다른 지름을 갖는 오리피스 형상이 동일한 궤적값들을 정규화하여 근사식과 어떤 차이를 보이는지 확인해 본 결과이다. 모든 오리피스형상에서 궤적값은 식 (3)에 근접해 있는 것을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 오리피스 내의 캐비테이션은 오리피스의 유입구가 각진 어느 특정한 가압 상황에서 발생하며 압력차가 커질수록 오리피스 끝단부로 캐비테이션의 영역이 확장된다.

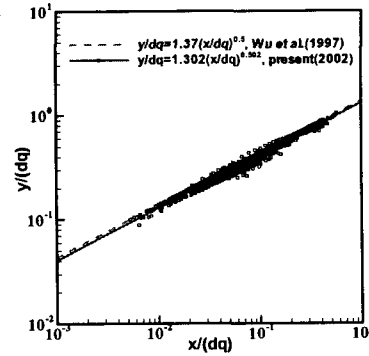


Fig. 5 All trajectories correlation

2. 오리피스 내 캐비테이션은 출구를 빠져나온 제트를 불안정하게 하는 요인이 된다.

3. 캐비테이션과 수력튀김은 액주의 분열거리를 감소시키는 결과를 보였지만 그것의 원인은 다르다고 생각된다. 캐비테이션은 그것이 성장하여 발생하는 흔들림에 의한 제트의 교란이 분열 과정을 빠르게 시작시키고 촉진시켜 액주의 분열이 빠르게 진행되는 반면 수력튀김은 강한 교란보다는 제트 단면적 감소에 의한 결과로 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] Wu, P. -K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Nejad, A. S., "Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows," Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 1, pp. 64-73, 1997.
- [2] Celia Soterious, Richard Andrews, and Mark Smith, "Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization," SAE Paper No. 950080, 1995.
- [3] Nurick, W. H., "Orifice Cavitation and Its Effects on Spray Mixing", Journal of Fluid Engineering, Vol. 98, pp. 681-687, 1976.[14] Vennard, J., Elementary Fluid Mechanics, Wiley, New York, 3rd ed., pp. 216-219.