

## 횡방향 유동에서 충돌형 분사기의 액체제트 분무 특성

송윤호\* · 이원구\* · 안규복\*†

## Spray Characteristics of Impinging Injectors in Crossflows

Yoonho Song\* · Woongu Lee\* · Kyubok Ahn\*†

### ABSTRACT

Spray characteristics of the impinging injectors in subsonic crossflows were experimentally studied and compared with the plain-orifice injectors. By changing the impingement angle (60, 90, 120) which is the same orifice length to diameter ratio ( $L/d = 5$ ), spray characteristics were investigated. In the view of the top view from the impinging injectors, as the impingement angle increases, the liquid column breakup length in the y-direction was decreased. On the other hand, when the impinging injector is viewed from the side view, the breakup length in the x direction is smaller than the previous plain-orifice injectors, which mean that the atomizing performance of the impingement-type injector is better than that of the single-hole orifice.

### 초 록

본 논문에서는 충돌형 분사기를 이용하여 수직분사 실험을 진행하였으며, 기존의 단공 오리피스 분사기와 비교하여 분무특성에 어떠한 변화가 있는지 실험적으로 연구하였다. 또한 동일 오리피스 길이 대 직경비( $L/d = 5$ )를 갖는 분사기를 바탕으로 충돌각(60, 90, 120)의 변화에 따른 액체 분무특성을 파악하였다. Top view의 기준 방향으로 y 방향에서의 분열길이 결과를 보면, 충돌각이 증가할수록 분열길이가 전체적으로 감소함을 알 수 있었다. 반면에 충돌형 분사기를 side view 기준으로 보았을 때, x 방향에서의 분열길이는 이전 단공노즐에서의 분열길이보다 더욱 감소하였으며, 이는 단공노즐의 분사기보다 충돌형 분사기의 미립화 성능이 우수함을 의미한다.

Key Words: Breakup length(분열길이), Crossflow(수직분사), Impinging injector(충돌형 분사기), Impingement angle(충돌각)

### 1. 서 론

충돌형 분사기의 경우, 두 액체제트의 충돌 모

멘텀을 이용하여 액상의 추진제가 미립화 및 혼합된다. 이러한 분사기들은 구조가 간단하며, 연소실 벽면의 열전달이 유리하다는 특징들 때문에 액체로켓 엔진에 많이 활용되었다.

Taylor[1]는 충돌형 분사기의 충돌각을 변화시

\* 충북대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kbahn@cbnu.ac.kr

켜가며, 액막의 모양과 시트 두께를 이론적으로 계산하였으며 또한 이를 실험적으로 비교하였다. Dombrowski and Hooper[2]는 난류 및 층류 충돌에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 두 액체 제트가 충돌시에 형성되는 액막 내부의 wave의 성장에 의하여 분무특성이 결정된다는 연구를 밝혔다. Heidmann 등[3]은 두 액체상태가 난류 조건을 기준으로 충돌되는 제트의 미립화 특성들을 오리피스 직경(d), 오리피스 직경 대 길이비(L/d), 제트의 길이(l), 제트의 속력(U), 두 분무 각도(2 $\theta$ ), 표면장력의 함수로 광범위한 실험적 연구를 수행하였다. 이처럼 충돌형 분사기의 미립화는 단공노즐 분사기와 달리 매우 많은 변수들에 의하여 복합적으로 작용하기 때문에 이에 대한 이론적 접근뿐만 아니라 실험적 연구가 활발히 수행되어 왔다.

본 연구에서는 충돌형 분사기 자체의 미립화 연구에 중점을 두기보다는 더 나아가 충돌형 분사기를 활용하여 수직분사 연구를 수행함으로써 기존의 공기흡입 엔진 시스템의 수직분사에 활용되는 단공노즐과 분무특성을 비교하는데 의의가 있다. 이 연구의 결과로 수직분사에서의 충돌형 액체제트 메커니즘을 이해하며, 공기흡입 엔진을 설계 시 효율을 극대화하기 위한 단서를 제공할 것이라 생각한다.

## 2. 실험방법

실험의 경우, 기존에 연구하였던 횡단류 유동에서의 수직분사 실험장치[4]를 그대로 이용하였다. 분사기의 경우, 동류체 충돌형 분사기(like and like impinging injector)를 사용하였다. 액체 제트에 수평으로 지나가는 횡단 유동장을 만들기 위하여 고압 압축기로 압축된 공기와 레귤레이터를 이용하였다. 분사기의 추진체로서는 물을 사용하였으며, 분사기의 수력성능을 파악하기 위하여 분사기의 유량측정 실험을 우선적으로 진행하였다. 분사조건에 따라 분무가 발달되는 형태들에 대해서는 고속 카메라(Vision Research, Phantom v9.1)를 이용하여 순간의 이미지를 촬

영하였다. Fig. 1에 사용된 충돌형 분사기의 내부 도면을 나타내었다. 충돌각( $\theta$ )이 변화함에 따라 분무특성이 어떻게 변하는지 알아보기 위해 충돌각을 60, 90, 120도로 설계를 하였다. Table 1에 충돌각과 분사기의 세부정보와 실험조건을 정리하였다.

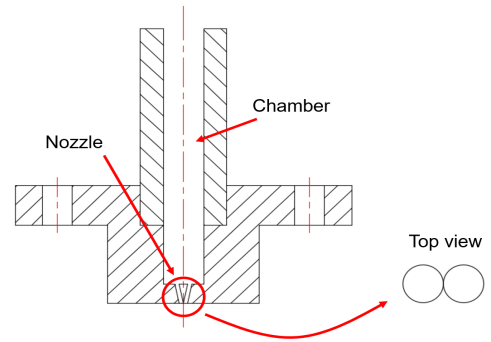


Fig. 1 Schematic of orifice geometry.

Table 1 Experimental conditions

Inj No.	C-5-60	C-5-90	C-5-120
Orifice diameter(d)	0.5 mm		
L/d	5		
angle( $\theta$ )	60	90	120
$\Delta P$ [bar]	1, 2, 3, 4, 5, 6		
Air velocity	50 m/s		

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 충돌형 액체제트의 분무특성

두 액체제트의 충돌에 의해 형성되는 분무의 경우, 내연기관에서 널리 활용되는 단일 오리피스 노즐과는 분무특성이 서로 다르게 나타난다. 일반적으로 단일 오리피스의 분사기는 오리피스 내부의 히스테르시스 및 대기공기와의 전단력과 압력에 의해 액체제트의 표면에 wave가 성장하

게 된다. 그러나 충돌형 분사기의 경우, 두 액체 제트가 충돌될 때 평면에 수직인 액체시트를 형성하며, 충격파에 의하여 시트는 액사로, 하류로 가면서 시트상의 wave에 의하여 액적으로 미립화 된다. 대기조건에서의 충돌형 분사기의 액체 제트 이미지를 Fig. 2에 나타냈으며, 동일 분무 차압을 기준으로 분사기의 view만 서로 다르게 하여 고속카메라를 이용하여 20장의 이미지를 얻었다.

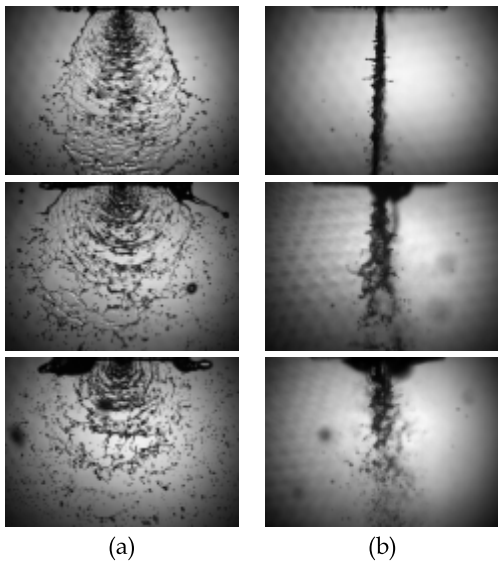


Fig. 2 Liquid jet images under ambient condition from 1 bar : a) side view, (b) top view(from top to bottom :  $\theta = 60, 90, 120$ )

이미지의 결과를 보면, 초기 1 bar 조건에서는 단조로운 액체 시트를 형성하며, 시트 주변에 rim에 의하여 둘러싸이게 된다. 충돌각이 커지게 되면, 액체제의 분무형태는 더욱 넓어지는 것을 볼 수 있다. 분열길이 또한 충돌각이 가장 큰 120도에서 육안으로도 짧아진 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 충돌형 액체제트의 분열길이

Figure 3은 top view 기준으로 in-house code를 이용하여, 각 분사기를 기준으로 x축에서의

분열길이 결과를 정리해둔 그래프이다. 오리피스 중심을 2.8 mm 기준에서 모든 이미지를 crop하여 총 400장의 이미지의 결과들을 분석하였다. 분열길이 결과를 보면, 전체적으로 단공노즐의 분열길이[4,5] 보다 약 45%정도 분열길이 감소한 것을 알 수 있다. 충돌형 분사기에서는 캐비테이션이 발달하더라도, 단공노즐에서의 분열길이 결과와 다르게 나타난다. 기존의 단공노즐에서는 캐비테이션이 분사기 내부에 발달되면, 분열길이 감소하지만 충돌형 분사기에서는 그렇지 않다. 이는 분사기 내부적인 유동특성 변화에 따른 분열길이 감소 영향보다는 첫 번째로 두 액체 제트가 강하게 충돌되면서 발생하는 충격파에 의한 분열길이 영향, 두 번째로 공기역학 힘에 의한 표면분열과 액주분열의 영향이 지배적인 것으로 생각된다.

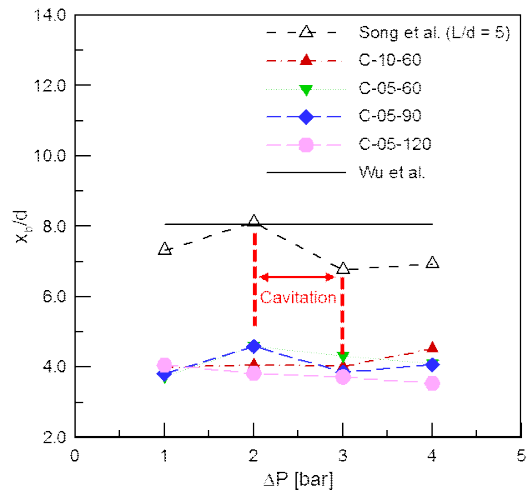


Fig. 3 x-directional liquid column breakup lengths and normalized by the orifice diameter

Figure 4는 side view 기준으로 Photoshop CS6을 이용하여, 오리피스 출구 중심 10.5 mm 기준으로 y방향에서의 분열길이를 측정하였다. 분열길이의 경우, ligament가 처음 발견되는 영역과 액주가 분리되는 영역을 기준으로 하였다. 결과를 보면, 전체적으로 대기조건에서의 분열길이 결과 보다 수직분사에서의 분열길이가 더욱

짧게 나타났다. 또한 top view의 결과와 마찬가지로 두 조건 모두 충돌각이 커질수록 분열길이 가 감소되는 것을 알 수 있다.

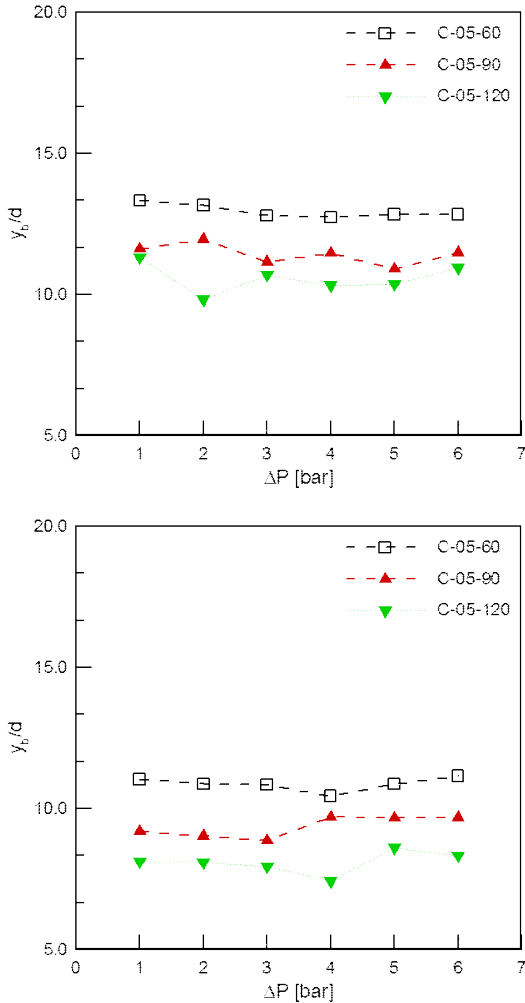


Fig. 4 y- directional liquid column breakup lengths and normalized by the orifice diameter(from top to bottom : ambient condition, crossflow)

#### 4. 결론

본 연구는 횡방향 유동에서 서로 다른 충돌각을 갖는 충돌형 분사기를 가지고 수직분사 실험을 진행하였다. 따라서 기존의 단공노즐에서의 수직분사 결과와 대기조건에서의 충돌형 분사기의 분무특성을 서로 비교하였다. 액주분열길이의 경우, 충돌각이 커질수록 분열길이가 감소하였다. 또한 top view 기준으로 x방향에서의 분열길이는 기존의 단공노즐의 경우보다 거의 절반 정도 분열길이가 줄어들었다.

#### 참고 문헌

1. Taylor, G. I., "Formation of Thin Flat Sheets of Water," *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 259, pp. 1-17, 1960.
2. Dombrowski, N. and Hooper, P. C., "A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 18, No. 3, pp. 392-400, 1964.
3. Heidmann, M. F., Priem, R. J., and Humphrey, J. C., "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets," *NACA, TN-3835*, 1957.
4. Song, Y., Hwang, D. and Ahn K., "Effect of Orifice Geometry on Spray Characteristics of Liquid Jet in Crossflow," *AIAA Paper 2017-1961*, 2017.
5. 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.