

# 아음속 수직분사제트에서의 가진 분무의 분무 특성연구

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

## Penetration and Breakup Characteristics of Pulsed Liquid Jets in Subsonic Crossflow

Jin-ki Kim\* · Jinkwan Song\* · Min-ki Kim\* · Yongseok Hwang\*\* · Youngbin Yoon\*\*\*

### ABSTRACT

The spray characteristics and liquid column penetration of steady and pulsed injection measurements have been experimentally studied using high speed camera in liquid jets injected into subsonic crossflow. The objectives of this research are to comparison the spray characteristics of steady injection with pulsed injection. Moreover, the effects of frequency are also studied. As the result, This research has been showed that pulsed injection has different penetration compared with steady injection.

### 초 록

횡단류 아음속 유동장에서 연료의 가진 수직 분사 시 나타나는 액적영역의 분무특성에 대하여 고속 카메라 촬영기법을 통하여 분석하였다. 본 연구의 목적은 정상 분무와 가진 분무의 분열길이 및 궤적을 관찰하고 가진 분무의 주파수 크기가 커지는 영향이 분무특성에 미치는 영향을 확인하는 것이다. 실험을 통하여 정상 분무와 가진 분무의 궤적과 분열길이가 차이를 연구하였다.

Key Words: Transverse Injection(수직분사), Pulsed Injection(가진분무), High Speed Camera(고속카메라)

### 1. 서 론

횡단류의 공기유동에 수직으로 분사하는 액체 연료 제트는 빠른 속도의 공기 유동장에서 구동

하는 램제트 엔진이나 스크램제트 엔진, 가스터빈 엔진의 후기연소기(after burner)등 공기를 산화제로 사용하는 추진제의 연료분사장치로 사용되며, 이러한 추진 및 동력장치 이외에도 항공기 엔진의 성능향상 및 안정성을 위한 유동제어, 터빈 블레이드 등의 막냉각, 연소 불안정성을 보정하기 위한 2차 분사장치 유동의 능동제어 등에 이용된다. 일반적으로 횡단류 유동장에 수직으로 분사되는 연료의 분무 구조는 액주영역(liquid

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 국방과학연구소

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: jiny79@snu.ac.kr

column region), 다소 큰 액적이 존재하게 되는 영역(ligament region), 액적 영역(spray plume region, droplet)으로 정의할 수 있다.[1] 이러한 분무과정은 다수의 복잡한 형상들이 상호 밀접하게 연결되어 있어 복합적인 현상으로 나타난다. 특히 고속 유동장의 램젯 엔진에서 액체연료는 높은 밀도와 발열량으로 이용이 증가하고 있으나, 연료의 착화에 앞서 연료의 증발과 혼합의 시간을 필요로 하고, 불충분한 혼합 시간으로 인한 연료액적의 증발 및 혼합은 연소기의 성능저하와 화염의 불안정성을 초래하게 된다. 이에 연소불안정을 보정하기 위한 능동제어 방법으로서 연료의 가진 분무를 연소불안정성의 보정 방법이 연구되어지고 있다. 그 원리는 연소 진동에 180도 위상차를 가지는 열 진동 소스를 더해 주는 것으로서 연소 불안정이 해소 되어 진다. 다양한 방법의 능동 제어 기술이 지난 수년 동안 제시되고 있으며, Sivasegaram et al. 과 McManus et al.의 논문에서 sound input, spark discharge, boundary-layer disruption 과 secondary fuel injection을 포함하는 다양한 제어 방식들을 비교 하였다. 하지만 열방출률이 큰 상황에서는 상대적으로 큰 압력 진동이 필요하므로 압력진동을 통하여 연소불안정을 해소하는 방법 보다는 연료 진동을 통하여 열방출률을 조정하는 것이 훨씬 현실적이다. 연료진동제어(Fuel oscillation control)은 크게 두 가지로 나누는데, 첫째는 전체적인 연료 유동의 진동을 조정하는 방식, 다른 하나는 부분적인 연료 유동을 조정하는 방식(Secondary fuel injection)이다. 후자의 경우가 약간의 연료량의 조절만으로 가능하기 때문에 더 많이 연구되어 지고 있다. 선행 연구자들로 Langhorne et al., Sivasegaram et al. 등에 의해 압력 진동이 줄어드는 효과를 보여주었다. 이들이 사용했던 방식은 주 화염 진동(flame oscillation)과 거의 같은 크기의 주파수에서 주기적으로 연료를 주입 하는 방식 이었는데 최근에는 Richard et al., Lee et al.의 논문에서 화염 진동 보다 더 낮은 주파수(sub harmonic)에서의 효과적인 제어를 보여주고 있다.[2]

연소불안정성의 제어를 위하여 이에 앞서 가

진 분무의 분무특성에 대한 선행연구가 필수적이라 할 수 있겠다. 따라서 본 연구에서는 고속 카메라 촬영 기법을 통하여 정상 분무와 가진 분무의 액적영역에서의 분무특성을 관찰하고 이에 따른 차이를 확인 하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

가진 분무를 분사하기 위하여 액추에이터로 솔레노이드 밸브(general valve 9series, Parker)를 사용하였고 솔레노이드 밸브 제어를 위하여 C# 프로그램을 이용하여 작성된 제어프로그램을 사용하였다. 동압센서(PCB)를 통하여 솔레노이드 밸브 작동 특성을 측정하였고, 솔레노이드 밸브의 가진으로 인한 연료라인 내에서의 맥동을 안정화시키기 위하여 어큐뮬레이터(Accumulator)를 사용하였다. 유량 측정을 위하여 Rotameter가 사용 되었다.

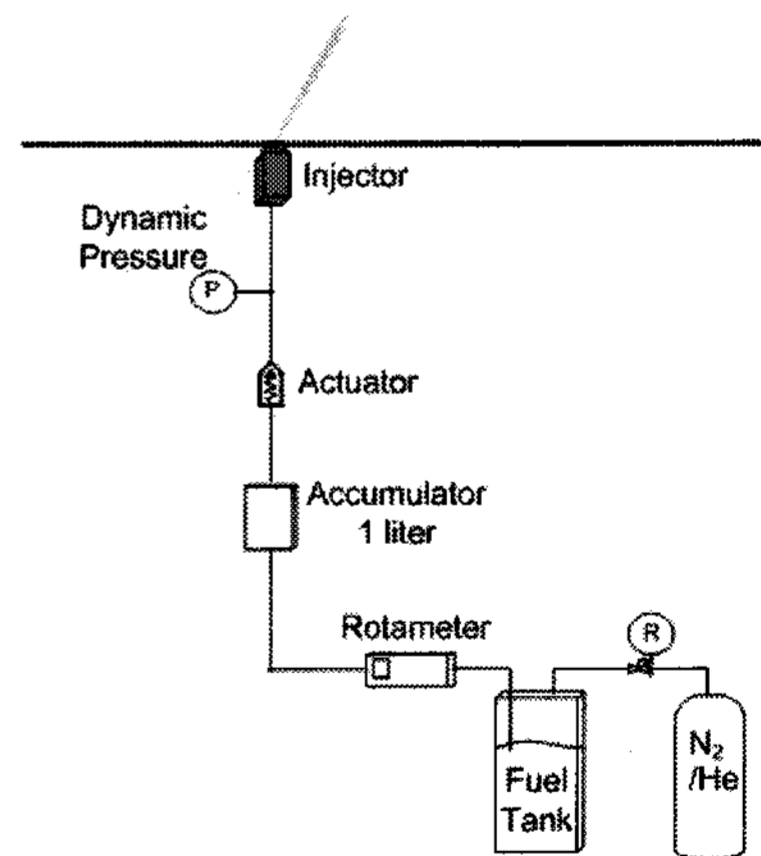


Fig. 1 Fuel supply Line

### 2.2 실험방법 및 조건

우선 정상 분무와 가진 분무의 경우에 대하여 유량실험을 하였고 가진 분무의 경우는 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz에 해당하는 주파수에 대한 분무 특성을 측정하였다. 가진 분무의 경우 듀티 사이클( $\alpha=0.5$ )의 영향으로 액추에이터인 솔레노

이드 밸브가 열려있는 시간이 절반에 해당 하므로 열려있는 시간만을 기준으로 유량을 계산하였다. 또한 액적영역의 분무특성 파악하고 가진 분무의 특성을 파악하기 위하여 일반적인 촬영 기법을 이용한 분석이 불가능하므로 고속촬영 기법을 이용하기 위하여 고속카메라를 사용하였으며 촬영조건은 초당 4000장, 셔터스피드 : 1/12000초, 1024 x 512 pixel이다.

Table 1. Experimental Condition

parameter	value
Air velocity	100 m/s, 150 m/s
Air temperature	300 K
Fuel temperature	300 K
Fuel	Water
Orifice Diameter	0.1 mm
Orifice Shape	chamfered orifice(chamfered angle=50°)
$\Delta P$ (bar)	3, 4, 5, 6
Frequency	Steady, 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz
Duty cycle	0.5

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 조건별 유량측정

본 실험에서는 물을 모의 추진제로 사용 하였고 이에 따른 유량 및 유출계수를 측정하였다.

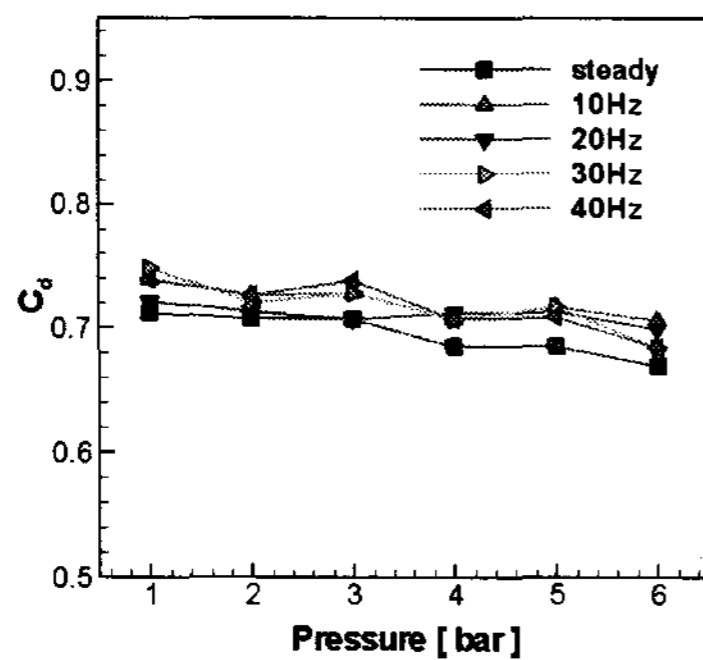


Fig. 2 Discharge Coefficient

Figure 2는 분사압력을 1bar부터 6bar까지 증가시키며 분사기의 유량을 측정하고, 유량 계수 (Discharge coefficient :Cd)를 구하여 주파수 변화와 연료의 속도에 따른 각 조건에서의 변화를 그린 그래프이다. 압력이 증가함에 따라 유량계수가 약간 감소하는 경향을 보이거나 거의 일정함을 알 수 있었고 정상 분무에 비해 가진 분무가 약간 유량 계수가 높은 것을 확인 할 수 있었다.

#### 3.2 동압 센서를 통한 주파수 신뢰도 측정

동압센서(PCB)를 통하여 액추에이터와 연료분사기사이에서의 동압을 측정하였다.

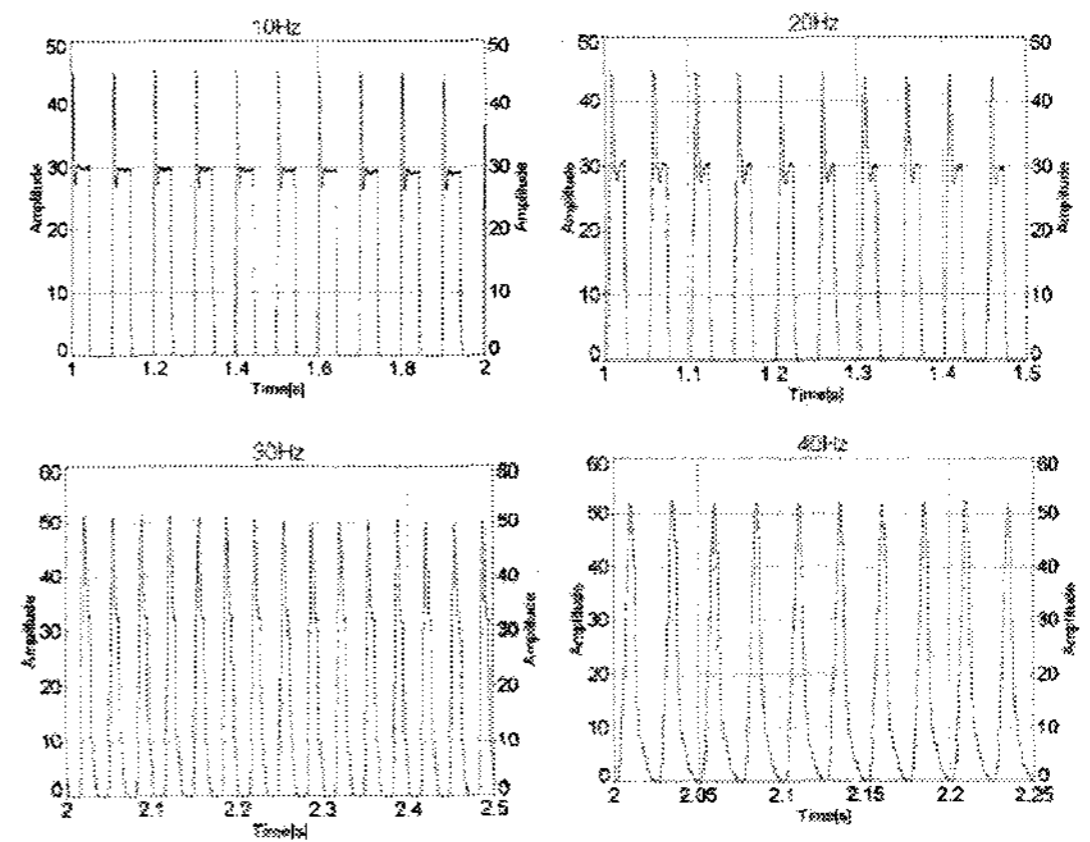


Fig. 3 Measurement of Frequency Reliability using Dynamic Sensor

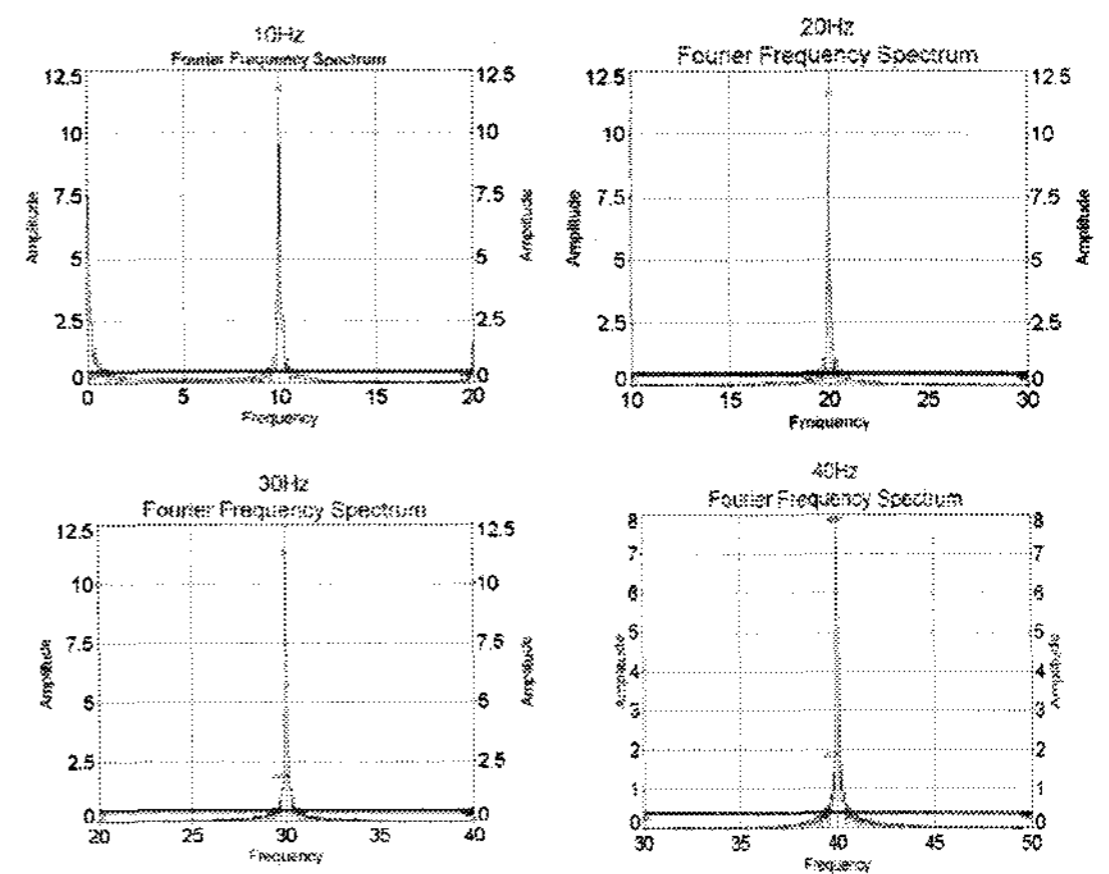


Fig. 4 Fourier Frequency Spectrum of Dynamic Sensor Measurement

동압센서로 측정된 신호가 수 mV이내의 작은 값이므로 이를 증폭시키기 위하여 시그널 컨디셔너를 이용하여 증폭된 신호를 LabVIEW 프로그램을 통하여 저장하고 분석하였다. Fig. 3은 시간에 따른 동압의 변화를 측정한 그래프로써 액추에이터의 동작 특성을 확인 할 수 있었다. 10Hz에서는 뚜렷한 사각파의 형태를 보이는 것을 확인하였고 20Hz에서 30Hz 40Hz로 가면서 사인파의 형태로 변하는 것을 볼 수 있었는데 초당 데이터의 수집개수를 4000개로 유지하여 고주파수가 될수록 사인파 형태가 된 것인지 액추에이터의 특성인지에 대한 추가적인 실험이 필요하다. Fig. 4는 주파수 변환을 통한 결과로서 각각에 해당하는 결과들이 목표 주파수에서 가장 큰 크기를 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통하여 원하는 액추에이터가 원하는 작동 조건에서 작동되고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 고속카메라를 통한 분무특성 분석

Table 1과 같은 실험조건에서 고속카메라 (FASTCAM-APX RS 250KC) 촬영을 통한 결과를 Matlab을 통하여 분무 궤적을 분석 하였다.

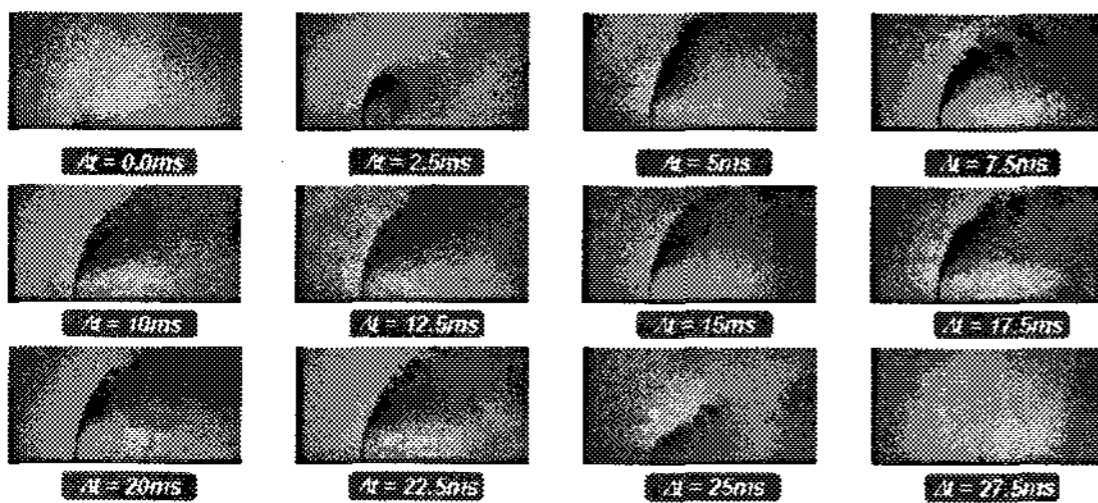


Fig. 5 High speed camera photography at 20Hz

Figure 5는 압력조건 5bar에서 촬영한 결과이고 20Hz의 해당 주파수의 경우 한주기가 50ms 이고 듀티 사이클이 0.5인 상태이므로 한주기의 반인 25ms 동안 분무가 생성되고 나머지 반주기 동안은 분무가 생성되지 않는 것을 확인 하였다. 이 분무 촬영을 통하여 얻어진 각각의 값들을 비교하였으며 일반 분무와 가진 분무의 비교를 위하여 가진 분무의 경우는 분무가 가장 안정화 되었다고 생각 되어지는 분무가 생성되는 25ms의

의 중간인 12.5ms를 전후한 사진들을 평균하여 궤적을 분석하였다. 10, 30, 40Hz의 경우에도 같은 방법을 통하여 평균된 이미지를 분석하였다.

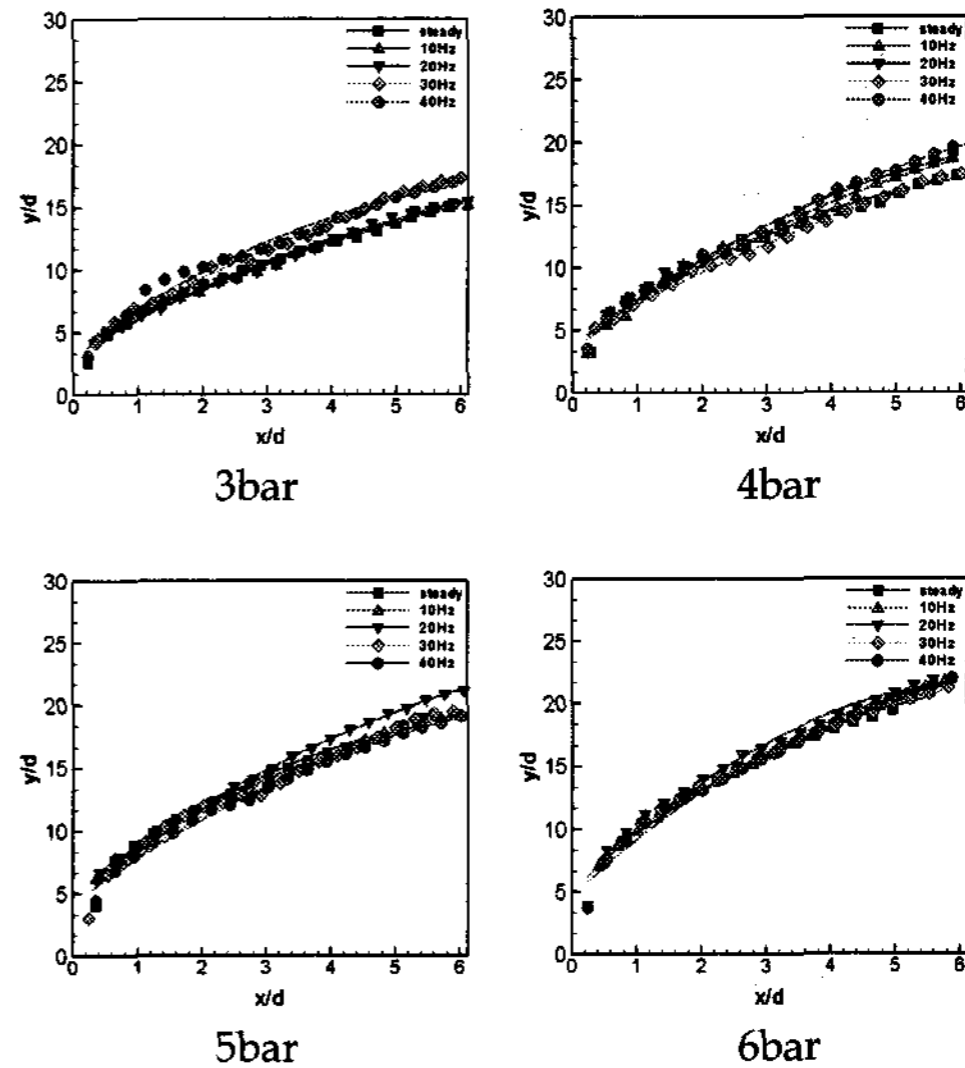


Fig. 6 Penetration of different pressure at 100m/s air velocity

Figure 6은 공기속도 100m/s 에서의 궤적을 분열점까지 비교 한 결과이다. 5bar인 경우를 제외하고는 정상 분무에 비하여 가진 분무의 경우가 주파수 증가에 따른 뚜렷한 효과는 관찰 되지 않았지만 y방향에 대한 침투거리가 증가 한 것을 볼 수 있다.

Figure 7은 공기속도 150m/s 에서의 궤적을 분열점까지 비교 한 결과이다. 5bar인 경우를 제외하고는 정상 분무나 10Hz의 경우에 비하여 30Hz, 40Hz의 가진 분무의 경우가 y방향에 대한 침투거리가 증가 한 것을 볼 수 있다. 이는 순간적인 닫힘과 열림의 반복과정에서의 모멘텀의 증가가 y방향으로의 침투거리에 영향을 미치는 것으로 예상된다.

Figure 8은 각 압력에 대한 궤적에 대한 결과 분석을 통하여 도출된 궤적식과 Wu등이 제안한 궤적식과 비교한 결과이다.[3],[4] 도출된 궤적식과 Wu등이 제안한 일반분무에 대한 궤적식과 거의 유사한 경향을 보이는 것을 볼 수 있었다. 이를

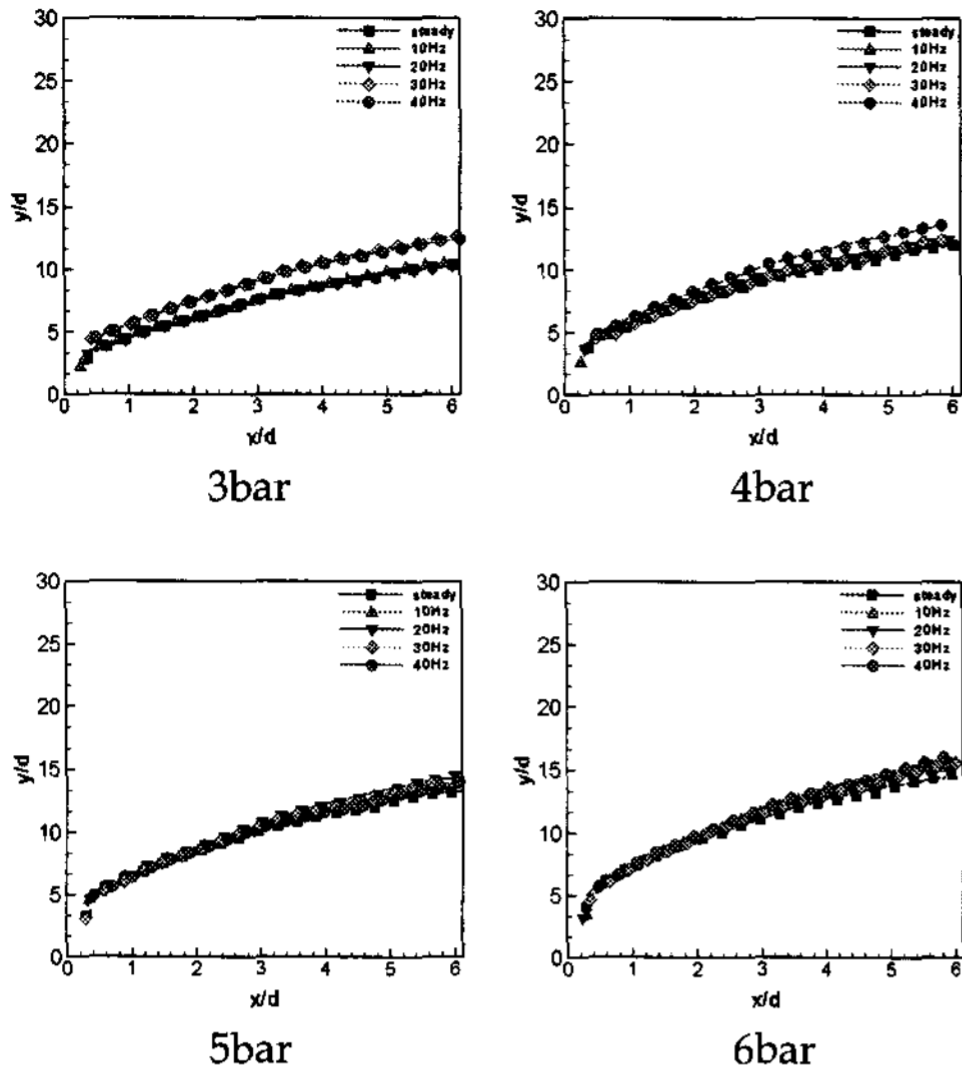


Fig. 7 Penetration of different pressure at 150m/s air velocity

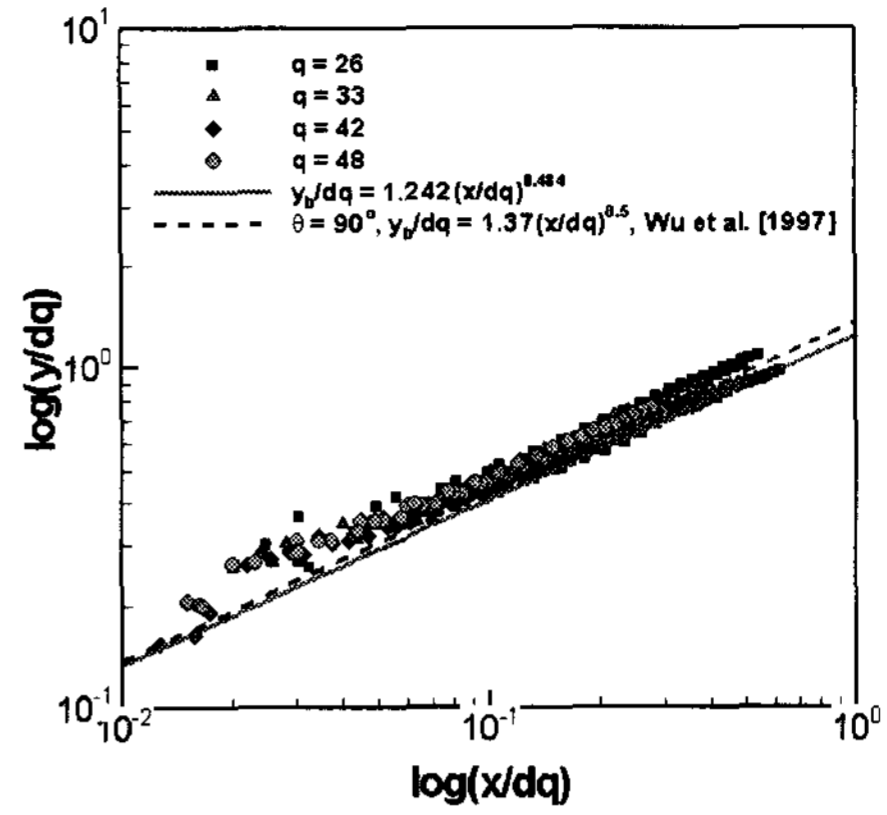


Fig. 9 Normalized penetration at 150m/s air velocity comparison with Wu et al. [1997]

#### 4. 결 론

수직분사제트의 정상 분무와 가진 분무에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 정상 분무에 비해 가진 분무의 y방향 침투거리가 증가 하는 것을 확인 하였다. 이는 순간적인 모멘텀의 증가의 영향으로 보인다.
2. 기존의 정상 분무에 대한 연구결과와 가진 분무의 결과를 비교 분석하여 Wu et al.의 궤적식에 대한 연구결과와 유사한 결과를 확인 할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 과제 연구지원을 받아 연구 수행되었기에 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Schetz.J.A. and Padhye.A., "Penetration and

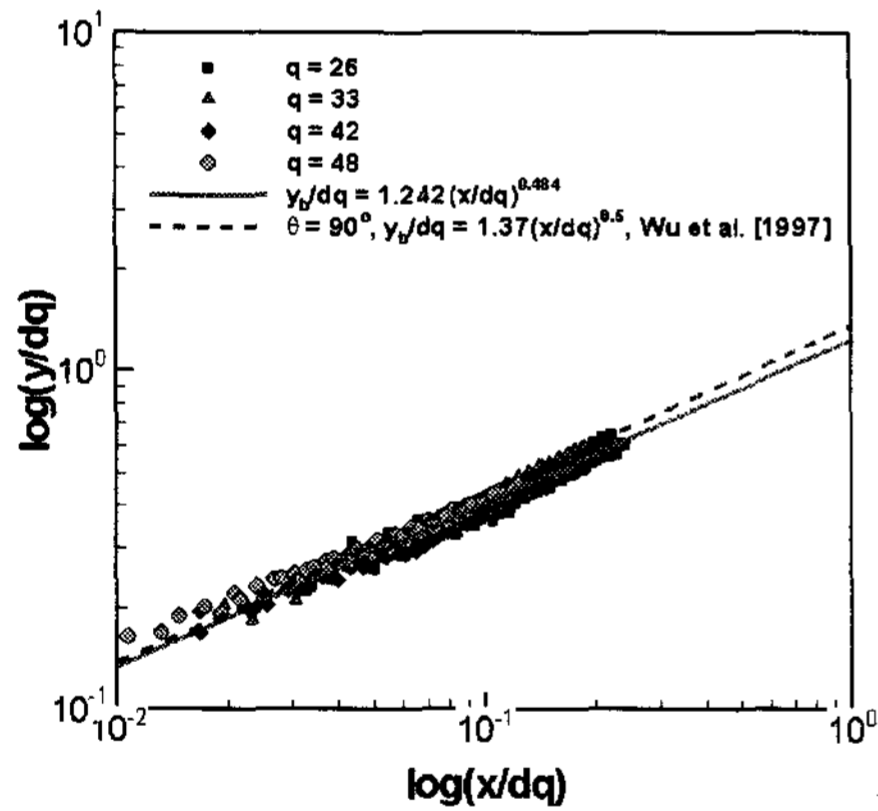


Fig. 8 Normalized penetration at 100m/s air velocity comparison with Wu et al. [1997]

통하여 가진 분무의 경우 y방향으로 약간의 침투거리의 증가를 볼 수 있었지만, 궤적식의 결과에서는 일반분무와 비슷한 궤적식을 나타내는 것을 토대로 기존의 궤적식을 이용하여 궤적을 예측 할 수 있을 것이다. Fig. 9에서는 공기속도 100m/s에서 도출된 결과식을 그대로 적용하였는데 Wu 등이 제안한 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

- Breakup of Liquids in Subsonic Airstreams", AIAA Journal, 15, 1385-1390, 1977.
2. C. M. Jones, J. G. Lee, Closed-loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection, Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, no. 4, 1999.
  3. Wu. P. K., Kirkendall. K. A., Fuller. R. P., Nejad. A. S., Break up Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows, Journal of Propulsion and Power, 13(1): 64-73, 1997.
  4. 송진관, 수직분사제트의 액정영역 분무특성에 관한 연구, 한국액체미립학회지, 제11권 제 2호, pp. 113~120, 2006. 추력 성능," 한국 추진공학회지, 제8권 2호, 2004, pp.32-38