

모델 램제트 연소기 내에서의 정상/가진 수직 분무 특성 연구

김진기* · 송진관* · 김민기* · 윤영빈† · 황용석**

An Investigation on the Spray Characteristics of Steady/Pulsed Jet in Crossflow in Model Ramjet Combustor

Jin-ki Kim, Jinkwan Song, Min-ki Kim, Youngbin Yoon and Yongseok Hwang

Key Words: Transverse injection(수직 분사), Liquid column trajectory(액주 궤적), Pulsed injection(가진 분무), Ramjet combustor(램제트 연소기)

Abstract

In this study, spray characteristics research of steady/pulsed injection in crossflow was performed experimentally in the model ramjet combustor. High-speed-camera photography was performed through a visualization window of model combustor, and then, steady and pulsed spray structures were observed and analyzed. Varying influx air temperature and fuel species, we could obtain the trajectory correlation in the steady injection case. In the experiment of pulsed injection, it is found that the pulsed frequency hardly influences spray trajectory. Also, it is found that, in the same injection pressure differential, the trajectory correlation of steady condition can be used for estimating pulsed spray trajectory.

기호설명

C_d	: 유량 계수
d	: 오리피스 지름
$q(\rho_f v_f^2 / \rho_a v_a^2)$: 액체/기체 모멘텀 플럭스 비
x	: 공기 흐름 방향 거리
y	: 공기 수직 방향 거리
θ	: 분사 각도
ΔP	: 분사 차압

1. 서론

횡단류의 공기 유동에 대해 수직으로 액체 연료를 분사하는 방법은 고속으로 공기를 흡입하는 램제트 엔진이나 스크램제트 엔진, 가스터빈 엔진의 보조추력기(afterburner) 등의 추진 기관에 많이 사용된다. 또, 위와 같은 추진/동력 기관 외에도 항공기 엔진의 성능향상 및 안정성을 위한 유동제어, 터빈 블레이드에 대한 막 냉각, 연소 불안정성을 보정하기 위한 이차 연료 분사 제어 등에 이용된다.

특히 고속으로 운행하는 램제트 엔진의 경우, 액체 연료는 높은 밀도와 발열량, 연료 제어의 용이성으로 이용도가 높아지고 있다. 그러나 연료/공기 혼합기의 착화에 앞서, 연료의 증발 및 혼합을 위한 시간이 필요하다. 또, 불충분한 혼합으로 인한 비균질 혼합기는 연소기의 성능저하와 화염의 불안정성을 초래하기 쉽다. 따라서 엔진 손상 및 파괴를 유발하는 연소 불안정을 보정하기 위한 대책이 요구되고 있다.

연소 불안정을 해결하기 위해서 배플(Baffle), 공진기

(2008년 6월 19일 접수 ~ 2008년 6월 24일 심사완료)

*서울대학교 기계항공공학부 대학원

**국방과학연구소

†책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

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

등의 엔진 내 구조물을 이용하는 수동 제어나, 연소 반응의 공간적/시간적 특성을 실시간으로 바꾸어 주는 능동 제어가 연구되고 있다. 연소 불안정의 능동 제어 기법은 최근 많이 연구되고 있는 방법으로, 주된 원리는 연소 진동에 180° 위상차를 가지는 열 진동 소스를 더해 주어 상호간의 섭동을 상쇄하는 방법이다. 이 세부 기법에 대해, McManus 등⁽²⁾은 음향 가진, 스파크 방출, 경계층 변경과 이차 연료 분사 등의 다양한 제어 방식들을 비교하였다. 하지만 실제 연소기와 같이 열 방출(Heat release)이 큰 상황에서는 그 양에 필적할만한 압력 진동을 일으키는 것이 쉽지 않기 때문에, 압력 진동을 통하여 연소 불안정을 해소하는 방법보다는 연료 진동을 통하여 열방출률을 조정하는 것이 보다 현실적이라 할 수 있다. 화염 진동에 연료 주입 주파수를 일치시킨 Langhorne 등⁽³⁾, Sivasegaram 등⁽⁴⁾과, 조화 주파수(Subharmonic frequency)를 이용한 Richard 등⁽⁵⁾, Jones 등⁽⁶⁾의 보고가 이를 뒷받침한다. 따라서 본 연구에서는 연소 불안정 해소를 위해서 이차 분사 기법이 보다 효율적이라는 판단 하에, 이를 수행하기 위한 선행 연구로써 가진 분무의 특성에 대한 연구를 수행하였다.

가진 분무에 대한 연구는 이미 많은 기관에서 수행되고 있었다. 하지만 일련의 연구가 주로 가스 터빈을 위한 내용이 주류를 이루었기 때문에, 기체 연료를 이용한 수직 분사가 이루어졌으며, 시험부는 대부분 횡으로 흐르는 액체 유동 터널였다.⁽⁷⁻⁹⁾ 이는 기체의 와류 특성 및 확산을 잘 보여주지만, 근본적으로 액체의 분열/확산 현상과 차이가 있다. 반면에, 기체 유동장으로 분사되는 액체 가진 분무에 대한 연구는 매우 미비하여, Stenzler 등⁽¹⁰⁾의 논문 정도만 보고 되고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 기체 유동장에 대한 액체 연료의 수직 분사에 대한 정상 분무에 대한 검증과 이를 이용한 가진 분무의 액적 영역 특성의 비교 및 고찰을 수행하고자 한다. 또한 액체 연료의 수직 분사에 대한 정상 분무 특성 연구로 많이 이용되는 Wu 등⁽¹⁾과의 비교도 동시에 수행되었다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 연료의 분무 특성과 연소 현상을 관찰할 수 있도록 제작하였다(Fig. 1). 혼합

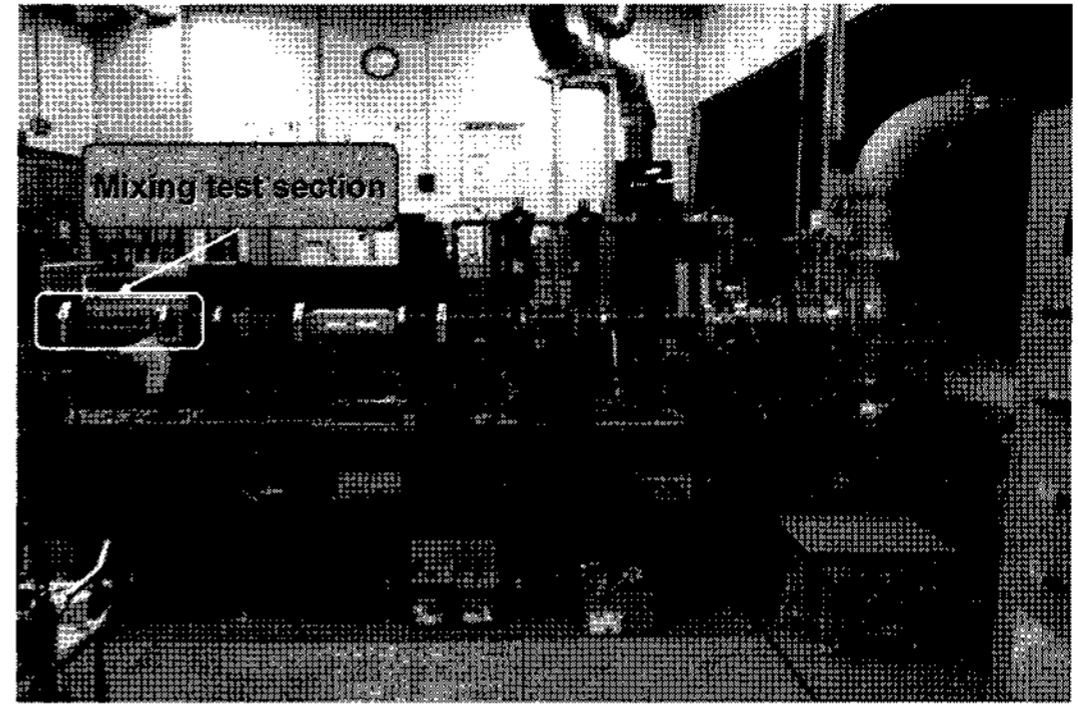


Fig. 1 Fuel supply Line



Fig. 2 Fuel supply Line

기 관측 장치는 Fig. 2와 같다. 히터로부터 들어오는 공기는 유로 면적 변경을 위한 디퓨저를 거쳐 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 의 단면적으로 들어오게 된다. 유입 공기는 첫 번째 가시화창부에서 연료와 혼합되게 된다. 연료의 분사는 가시화 창 영역의 바닥 면에 있는 장착부에 어댑터를 이용하여 분사기를 설치하여 수행한다. 고온 및 상온에서의 물과 연료를 분사하여 분무 형상을 관찰하고, 동시에 연소기에서의 연소 특성 및 화염 형상을 분석하여 분사기의 분무 형상에 따른 연소 특성의 상관관계에 대해서 연구할 수 있다. 분사기는 압력 분사형 분사기(Plain orifice type injector)를 사용하였다.

가진 분무를 분사하기 위하여 액추에이터로 솔레노이드 밸브(general valve 9series, Parker)를 사용하였고 솔레노이드 밸브 제어를 위하여 C# 프로그램을 통해 작성한 제어프로그램을 사용하였다. 동압센서(PCB 사)를 통하여 솔레노이드 밸브 작동 특성을 측정하였고, 가진으로 인한 연료 라인 내에서의 맥동을 안정화시키기 위하여 어큐뮬레이터(Accumulator)를 사용하였다(Fig. 3).

2.2 실험방법 및 조건

정상 분무와 가진 분무의 경우에 대하여 유량실험을 하였고, 가진 분무의 경우는 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz에 해당하는 주파수에 대한 분무 특성을 측정하였다.

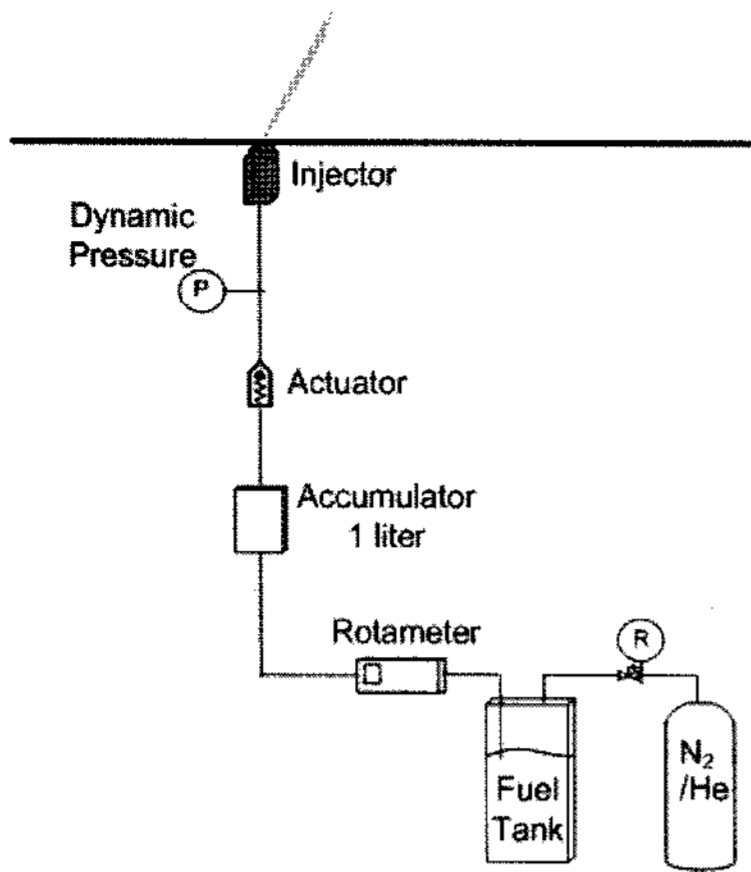


Fig. 3 Secondary Fuel supply Line

Table 1. Experimental Condition

Parameter	Value
Air velocity	90~170 m/s
Air temperature	300 K
Fuel temperature	상온 (288K, 300K), 고온 (500~600K)
Fuel	Water, Kerosene
Orifice Diameter	0.5 mm
Orifice Shape	chamfered orifice ($\alpha=50^\circ$)
ΔP (bar)	3, 4, 5, 6
Frequency (Hz)	Steady, 10, 20, 30, 40
Duty cycle	0.5

가진 분무의 경우, 한 주기 내 솔레노이드 밸브 온 (on) 사이클의 비율을 의미하는 듀티 사이클을 0.5로 고정하였다. 각 주파수 조건에 대해 총 연료 유량을 직접 측정하였으며, 액추에이터인 솔레노이드 밸브가 열려있는 시간이 주기 대비 절반에 해당하므로, 열려 있는 시간만을 기준으로 초당 유량을 계산하였다. 동시에 고속 카메라 촬영을 통해 가진 분무 시간이 솔레노이드 밸브의 온 사이클 시간과 동일함을 확인하였다. 액적영역의 분무 특성을 파악하거나, 가진 분무의 특성을 파악하기 위하여 고속 카메라를 이용한 촬영기법을 사용하였으며, 촬영 조건은 초당 4000장, 셔터스피드 : 1/12000초, 1024x512 pixel이다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 공기온도/연료종류에 따른 정상 분무 특성

물과 등유를 사용하여 주 연료 분사의 분무 궤적에 대하여 연구를 진행하였다. 실제로 연소실험에 사용되어진 Jet-A를 대신하여 특성이 비슷한 상용 등유를 사용하였다. 램제트 엔진에서의 고온 환경을 모사하기 위해, 약 500~600K 사이의 고온 공기를 공급하여 등유의 분무 특성을 연구하였다. 이와 동시에 상온 공기를 공급하여, 상온 시 등유의 분무 궤적도 측정하였다. 등유의 궤적 특성을 이해하기 위해, 유사연료로 많이 사용하는 물에 대해 상온과 고온 공기 시의 궤적을 측정하였다. 이때 사용한 유량은 0.18 kg/s로 동일하여 유지하였기 때문에, 온도에 따라 상온 공기(288K, 15°C, $\rho_a=1.23 \text{ kg/m}^3$)는 91.46 m/s, 고온 공기(532K, 269°C, $\rho_a=1.23 \text{ kg/m}^3$)는 166.67 m/s로 속도가 바뀌었다.

Figures 4는 각각 상온, 고온에서의 물과 등유의 수직 분무를 촬영한 결과이다. 가로 방향으로 분사 차압을 높인 경우이며, 세로로 각각 상온/고온의 물 사용 시험, 상온/고온의 등유 사용 시험을 보여준다. 상온과 고온을 비교하면, 차이가 크지 않으나 고온의 궤적이 보다 더 하류 방향으로 구부러짐을 보여준다. 이는 공기가 고온이 되면서 밀도가 낮아지게 되어 보유 모멘텀을 줄이는 역할을 하게 된다. 하지만, 동시에 동일한 유량에 대하여 온도에 따른 속도의 증가 때문에 모멘텀의 증가분이 발생한다. 일반적으로 수직 분무의 궤적은 액체/기체 간의 상호 모멘텀 교환에 의해 발생한다고 알려져 있고, 이에 대해 속도의 증가분이 제공으로 이루어져, 고온 공기의 모멘텀이 동일 유량의 상온 공기의 모멘텀에 비해 커지게 된다. 따라서 고온 횡단류의 경우, 더 하류로 구부러지는 현상이 보이게 된다.

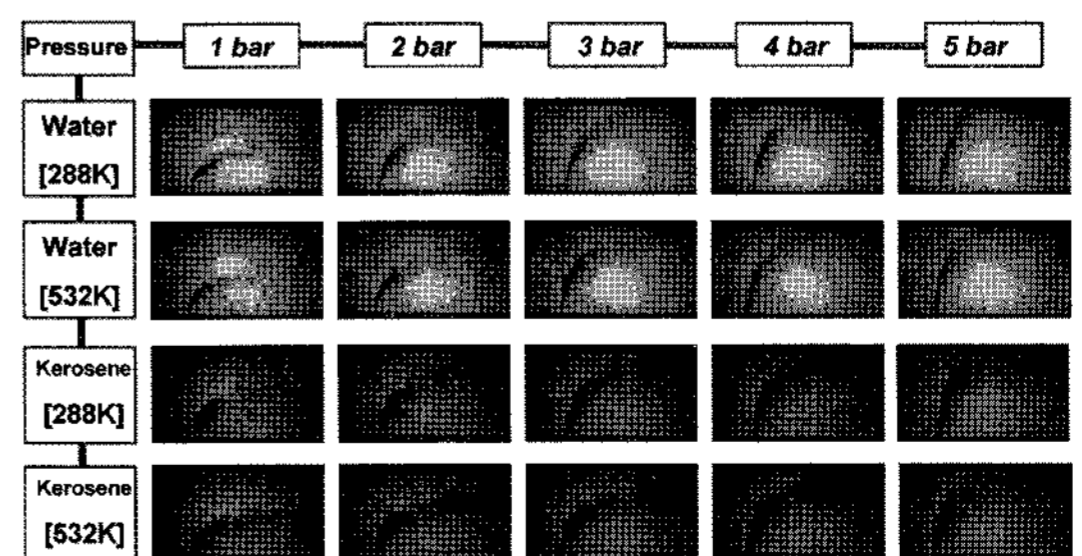
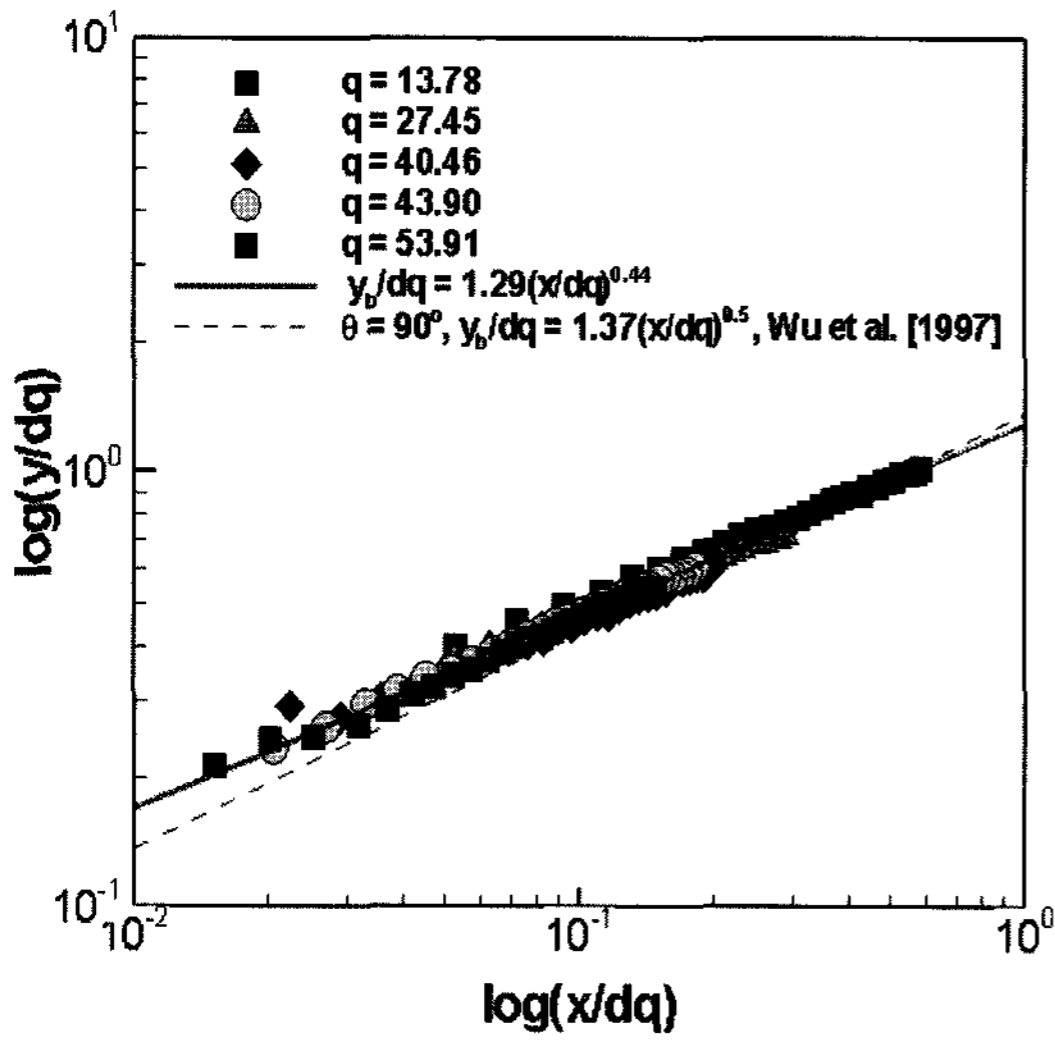
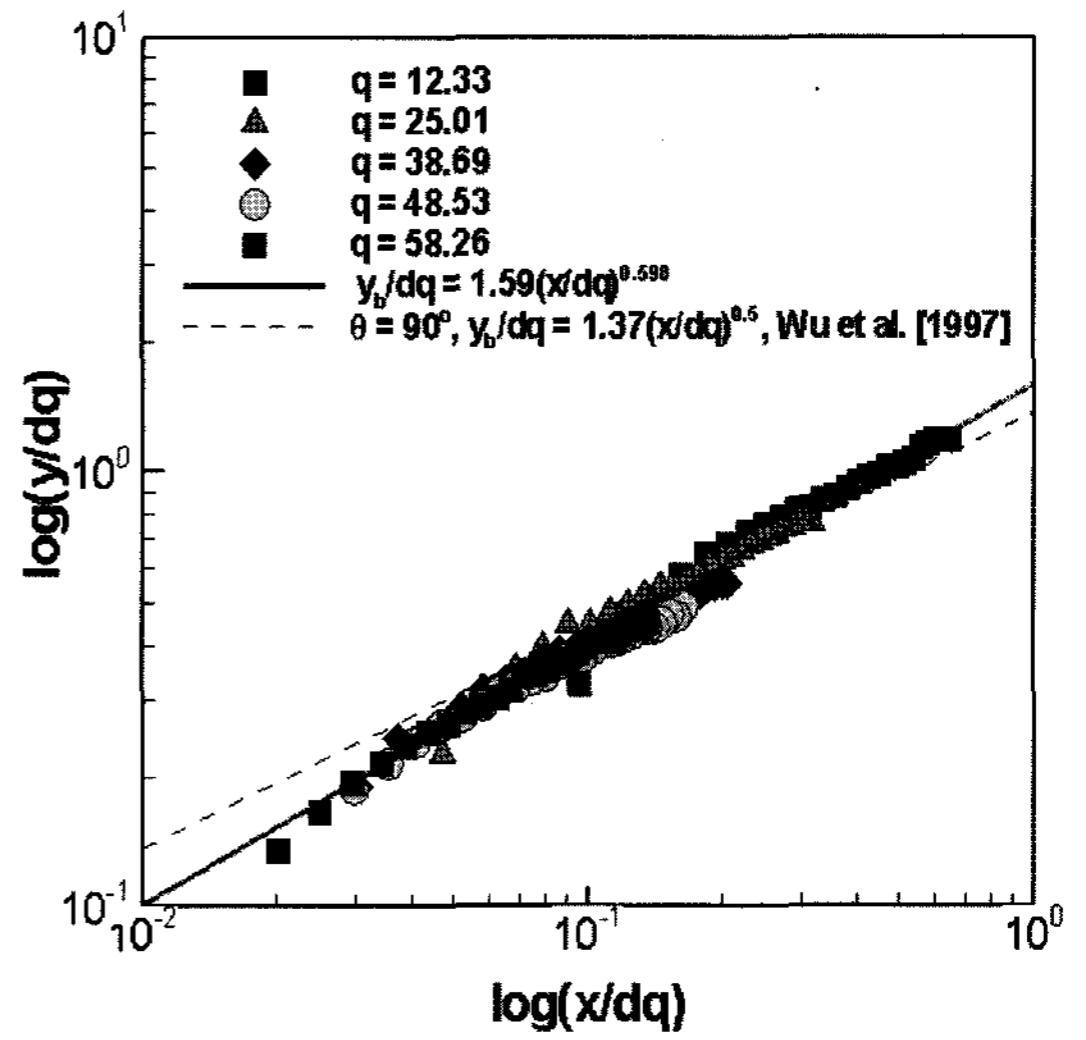


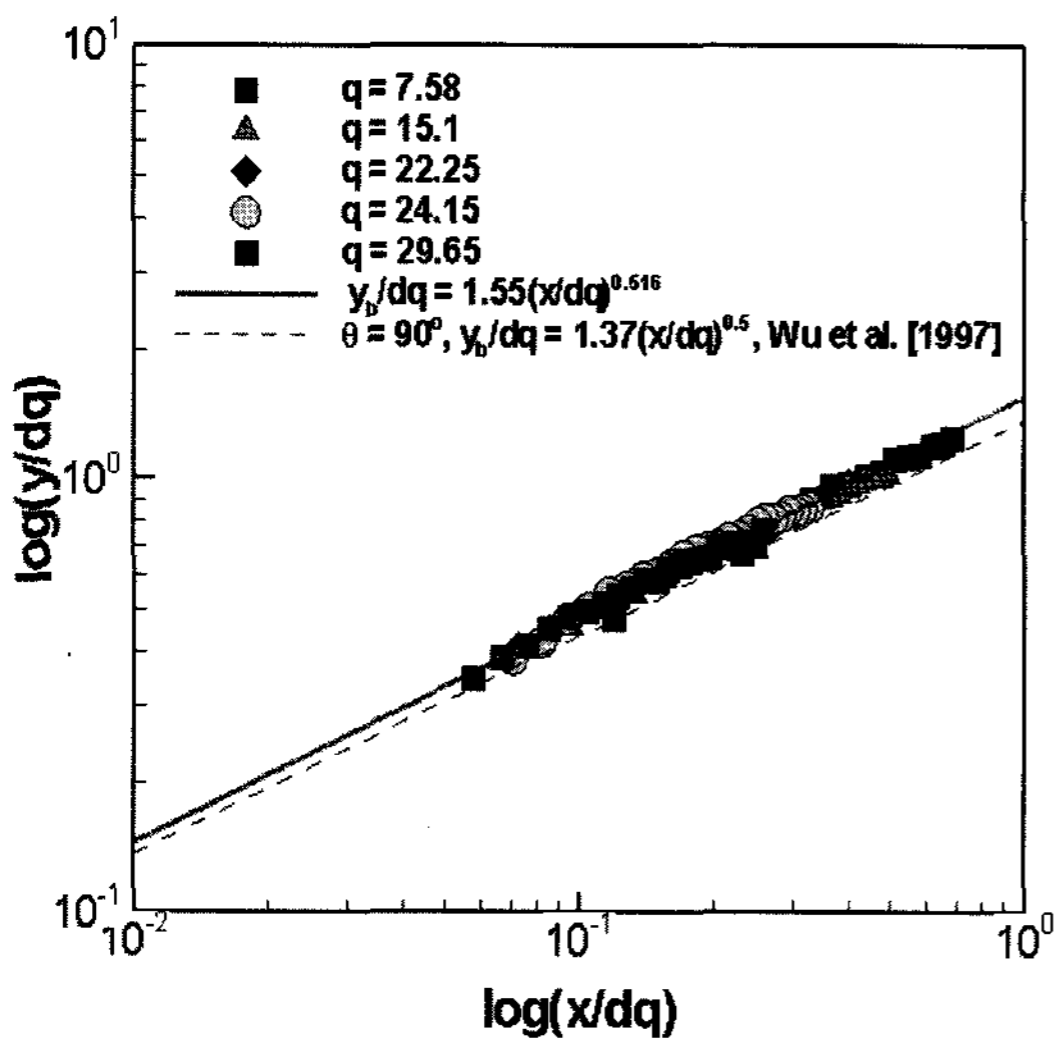
Fig. 4 Spray trajectory comparison of water and kerosene in room/hot air crossflow



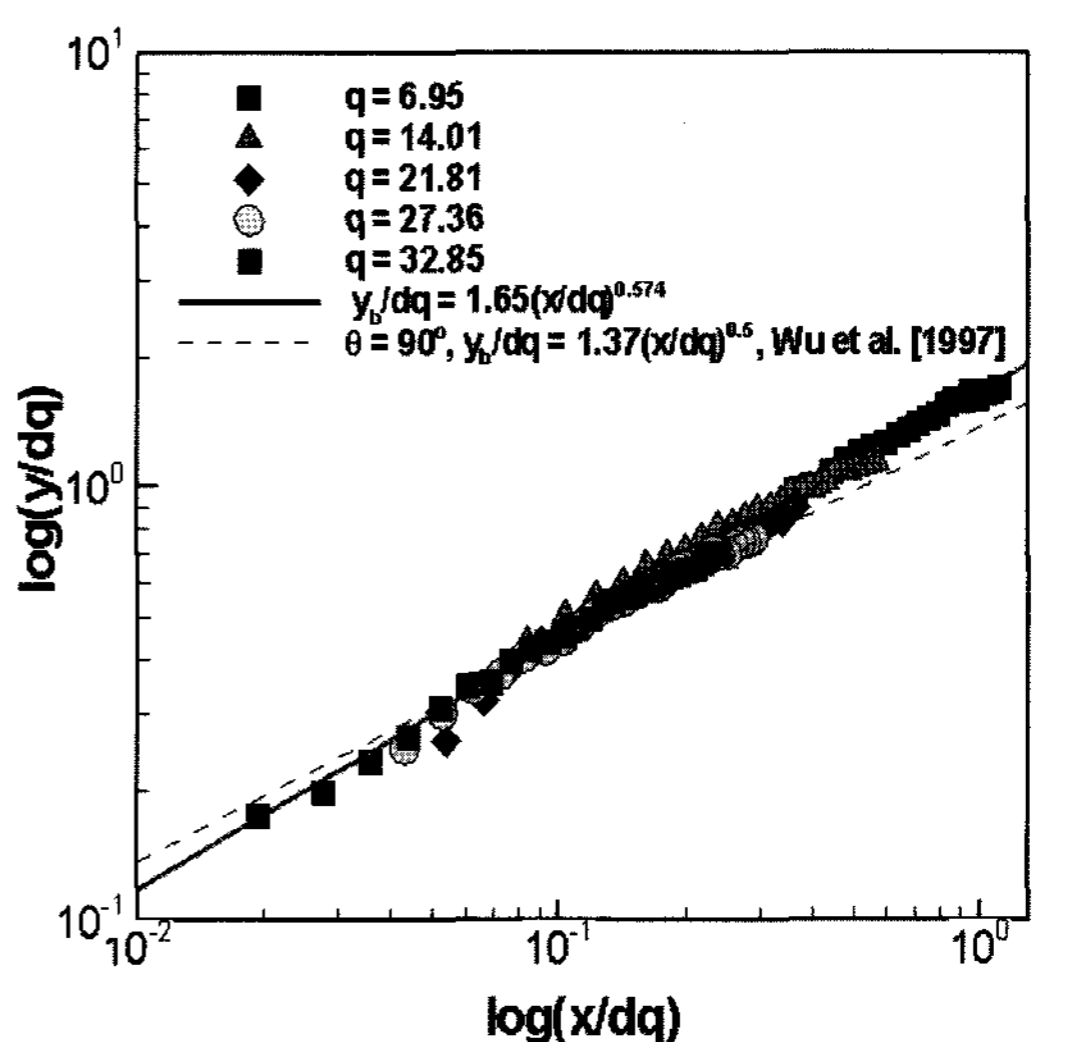
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Comparison with Wu *et al.*⁽¹⁾ results using fuel as water : (a) Ta=288K, (b) Ta=573K

Fig. 6 Comparison with Wu *et al.*⁽¹⁾ results using fuel as kerosene : (a) Ta=288K, (b) Ta=573K

또한 물과 등유를 서로 비교해 보았을 때, 물의 침투 거리가 등유의 침투 거리보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 역시 모멘텀 교환의 과정에서 물의 밀도가 크에 따라 모멘텀이 더 컸기 때문이라고 생각할 수 있다. 여기서 특기할 만한 사항은, 물에 비해 등유의 점성이 낮아서 분무의 확산도가 더 크게 나타남을 볼 수 있으며, 이로 인해 분무 특성이 약간 차이가 남을 볼 수 있다.

Figure 5는 각각 상온과 고온 공기 조건에서 물의 액

주영역에서의 궤적을 정규화한 식과 Wu등⁽¹⁾의 궤적 관계식을 비교한 결과이다. 분열이 일어나기 전 영역 $x/d < 10$ 이하인 액주 영역에서 Wu 등은 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$\frac{y}{dq} = 1.37 \left[\frac{x}{dq} \right]^{0.5}$$

위 식에서 각각 x 는 공기 흐름에 대해 흐름 방향으로 분사 출구부터의 거리, y 는 공기 흐름에 대해 수직 방향으로 분사 출구부터의 거리, d 는 분사기의 오리피스

지름, q 는 액체/기체 모멘텀 플럭스 비를 의미한다.

본 실험에서 액체/기체 모멘텀 플럭스 비(q)가 13.78~53.91인 영역에 대하여 궤적 관계식을 구하였다.

$$\frac{y}{dq} = 1.29 \left[\frac{x}{dq} \right]^{0.44}$$

Wu의 궤적 관계식과 비교 하였을 때, 비례 상수와 차수에 약간의 차이가 있지만 실험 결과와 궤적 관계식이 거의 일치하는 경향성을 확인 할 수 있었다.

Figure 5(b)는 물을 연료로 사용하였을 때의 고온 공기 조건에서의 궤적 관계식과 Wu의 궤적 관계식을 비교한 결과이다. 가 7.58~29.65인 영역에 대하여 궤적 관계식을 구하였고 다음과 같다.

하지만 상용 프로그램(Tecplot 10)을 이용한 계수 및 지수 계산에서 나온 결과로, Wu 등의 식과 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 고온영역에서도 Wu의 궤적 관계식을 이용하여 액주영역의 궤적을 예측 할 수 있으며, 공기 온도의 영향을 무시할 수 없으나, 온도 변화가 가져온 모멘텀의 변화로 차이의 설명이 가능하다는 것을 알게 되었다. 즉, 공기의 온도가 높아져서 공기의 밀도가 낮아지더라도, 공기의 밀도 또한 모멘텀 플럭스 비의 함수이므로 모멘텀 플럭스 비를 계산함으로써 액주 영역의 궤적에 대한 어느 정도의 경향성을 확보 할 수 있다.

Figure 6은 각각 상온과 고온 공기 조건에서 등유의 액주영역에서의 궤적을 정규화한 식과 Wu등의 궤적 관계식을 비교한 결과이다. 물과 마찬가지로 Wu 등의 궤적 식과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 하지만 실험 데이터들은 조금씩 맞지 않는 경향을 보여주고 있는데, 이는 점성에 의한 영향이 어느 정도 포함되어 있는 것으로 보인다.

3.2 가진 주파수에 따른 유량측정

가진 분무 시, 각 가진 주파수가 유량에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 본 실험에서는 물을 유사 연료로 사용 하였고 이에 따른 유출계수를 측정하였다. Fig. 7은, 분사 차압을 1 bar부터 6 bar까지 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 보인다. 이는 주파수와 무관하게 비슷한 감소 경향을 보여주고 있으며, 정상 분무에 비해 가진 분무의 유량계수가 약간 더 높은 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 유량계수 그래프의 크기가 주파수의 크기와 특별한 관계가 없는 것으로 판단

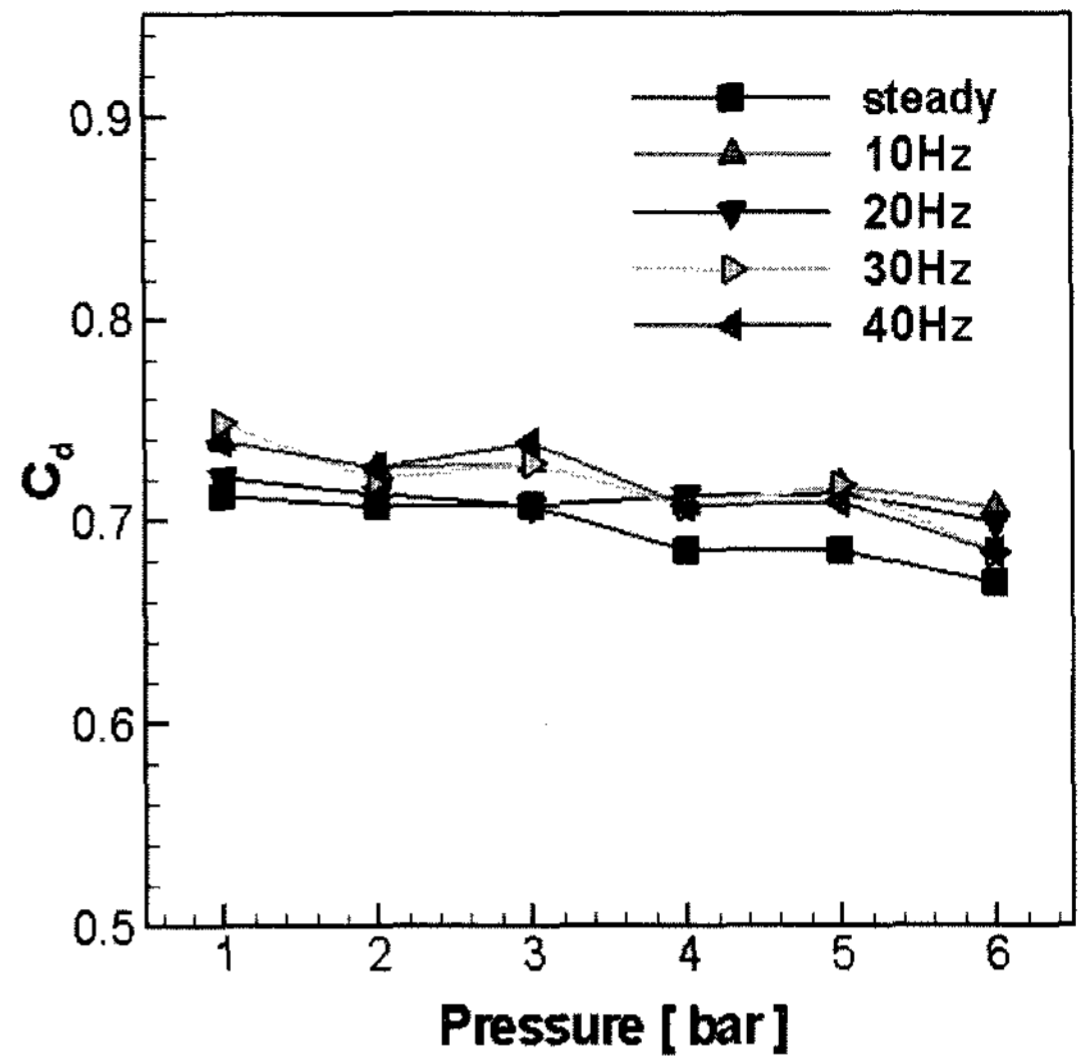


Fig. 7 Discharge Coefficient with fuel pulse frequency

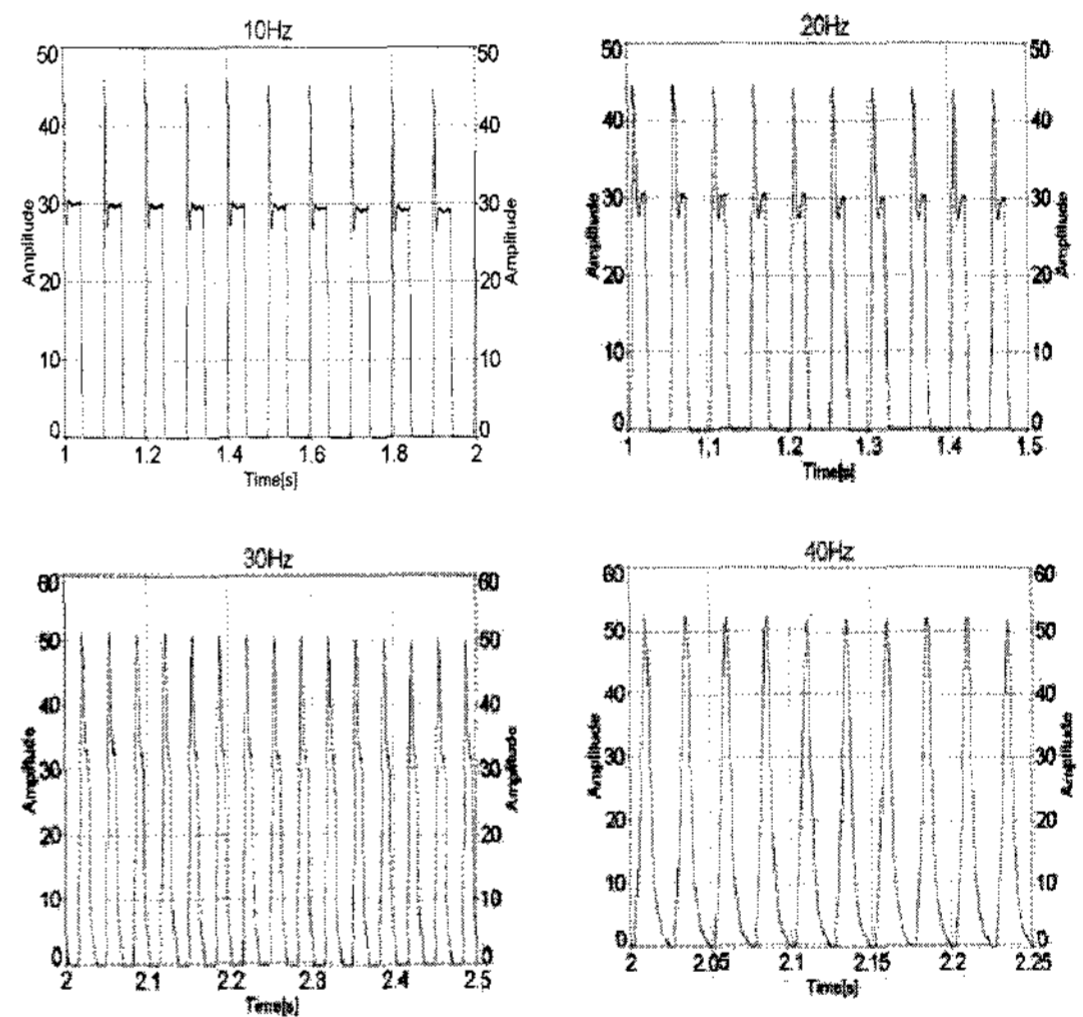


Fig. 8 Measurement of Frequency Reliability using Dynamic Sensor

된다. 따라서 정상 분무의 경우의 결과와 그래프의 형상이 거의 일치한다는 점에서, 3.3에서 설명할 내용과 같이 급격한 압력 변화에 따른 유량의 증감이 추가된 것일 뿐, 기본적인 분무 특성의 변화가 발생하지 않는 것으로 생각된다.

3.3 동압 센서를 통한 주파수 신뢰도 측정

동압센서(PCB사)를 통하여 액추에이터와 연료분사기 사이에서의 동압을 측정하였다. 동압센서로 측정된 신호가 수 mV 이내의 작은 값이므로 이를 증폭시키기 위

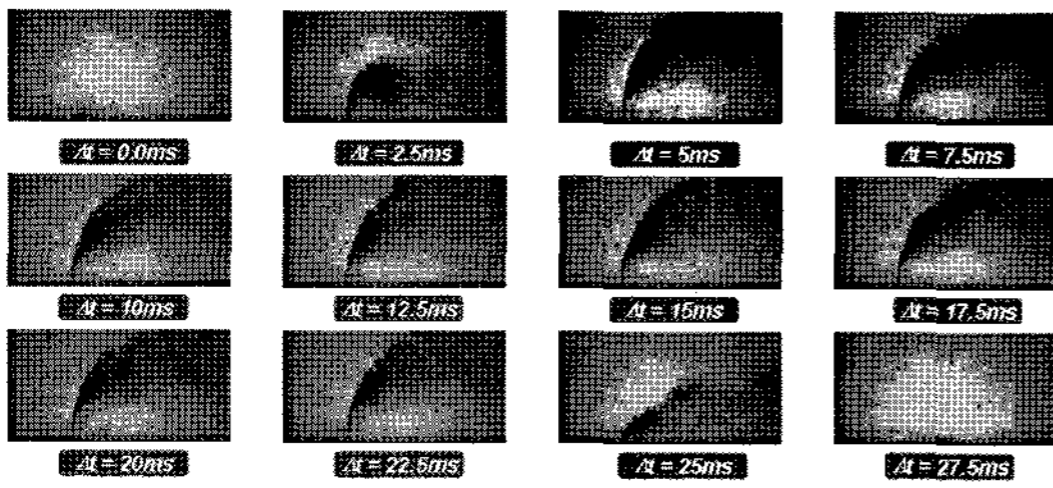


Fig. 9 High speed camera photography at 20 Hz

하여 동일 회사의 시그널 컨디셔너를 이용하여 증폭된 신호를 LabVIEW 프로그램을 통하여 저장하고 분석하였다. Fig. 8은 시간에 따른 동압의 변화를 측정된 그래프로서 액추에이터의 동작 특성을 확인할 수 있었다. 10 Hz에서는 뚜렷한 사각파의 형태를 보이는 것을 확인하였다. 그러나 액추에이터가 열려 압력이 전달되는 순간, 압력이 크게 증가하였다가 가라앉는 현상이 확인되었다. 이와 같은 현상은 20 Hz에서 30 Hz, 40 Hz로 가면서 한 주기의 시간이 짧아져, 압력이 완전히 가라앉아 사각파를 만드는 시간이 부족해지면서 사인파에 가까운 형태로 변하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 현상으로 인해 가진 분무 시 유량 계수의 증가가 발생했던 것으로 생각된다.

3.4 고속카메라를 통한 가진 분무 특성 분석

Table 1과 같은 실험조건에서 고속 카메라(FASTCAM-APX RS 250KC) 촬영을 통한 결과를 Matlab을 이용하여 분무 궤적을 분석하였다. Fig. 9은 분사 차압 5 bar, 연료 가진 주파수 20 Hz에서 촬영한 결과이다. 20 Hz의 경우 한 주기가 50 ms이며, 듀티 사이클이 0.5로 주었기 때문에 한 주기의 반인 25 ms 동안 분무가 생성되어야 하며, 나머지 반 주기 동안은 분무가 생성되지 않아야 한다. 고속 카메라를 이용하여 얻은 분무 이미지를 이용하여 분석을 해본 결과, Fig. 10과 같은 한 주기의 분무 구조를 얻을 수 있었다. 초기 분무가 생성되는 구간은 바로 전 시간의 분무 구조가 다음 현상에 계속 영향을 주면서 분무가 뭉쳐 있음을 확인할 수 있다. 완전히 침투가 이루어지면, 5 ms 시에 액추에이터가 열리는 순간의 압력 급상승의 영향으로 인해 여타 이미지에 비해 더 큰 침투 거리를 가진 분무가 발생함을 확인할 수 있었다. 약 25 ms, 즉 50%의 주기 동안 동일한 분무 궤적을 유지하다가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 열린 주기 시작과 끝 부분의 좁은 가변구간을 제외한 영역에서는 정상 유동에 흡사한 유동을 가지고 있다는 것을

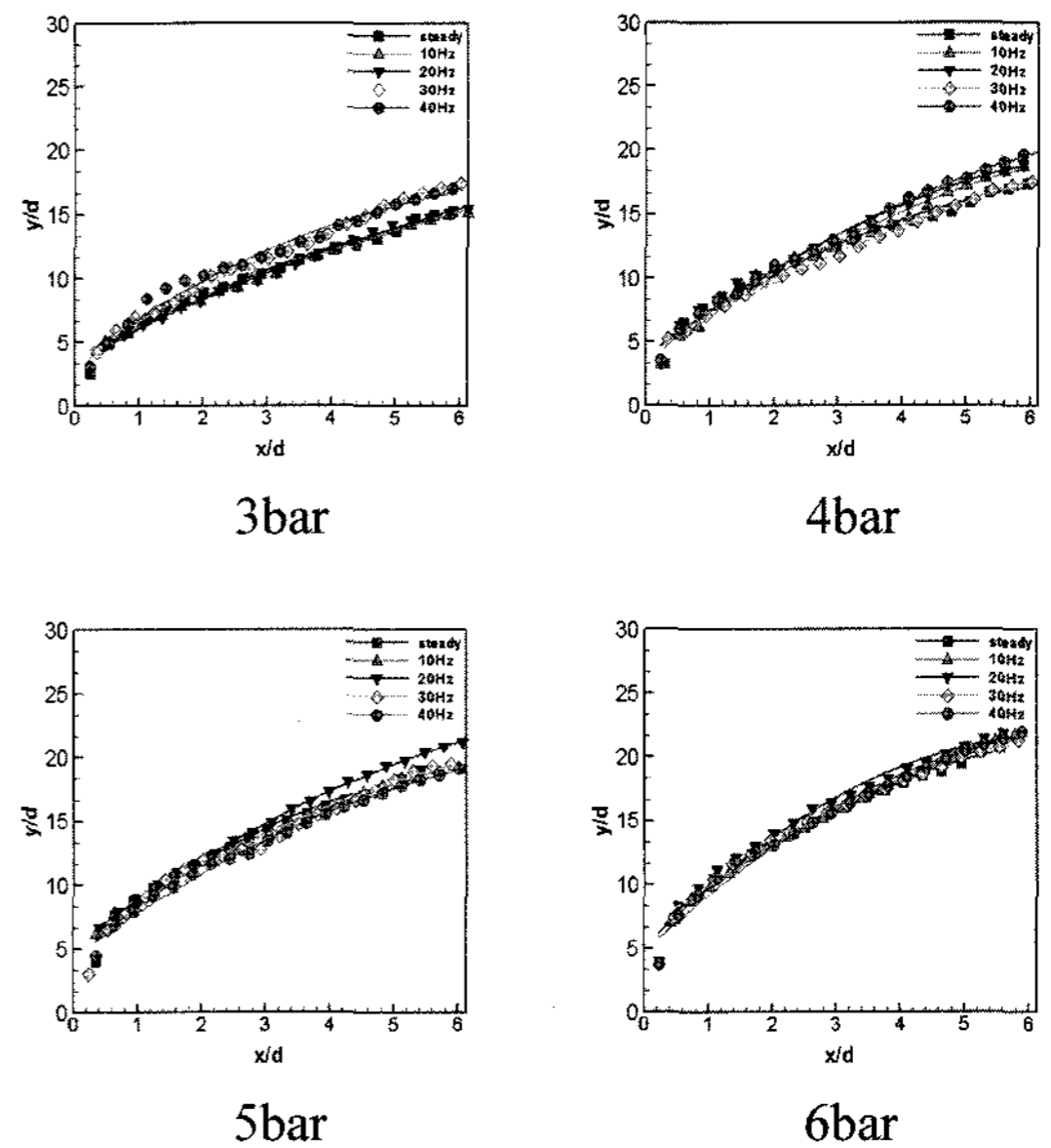


Fig. 10 Penetration of different pressure at 100 m/s air velocity

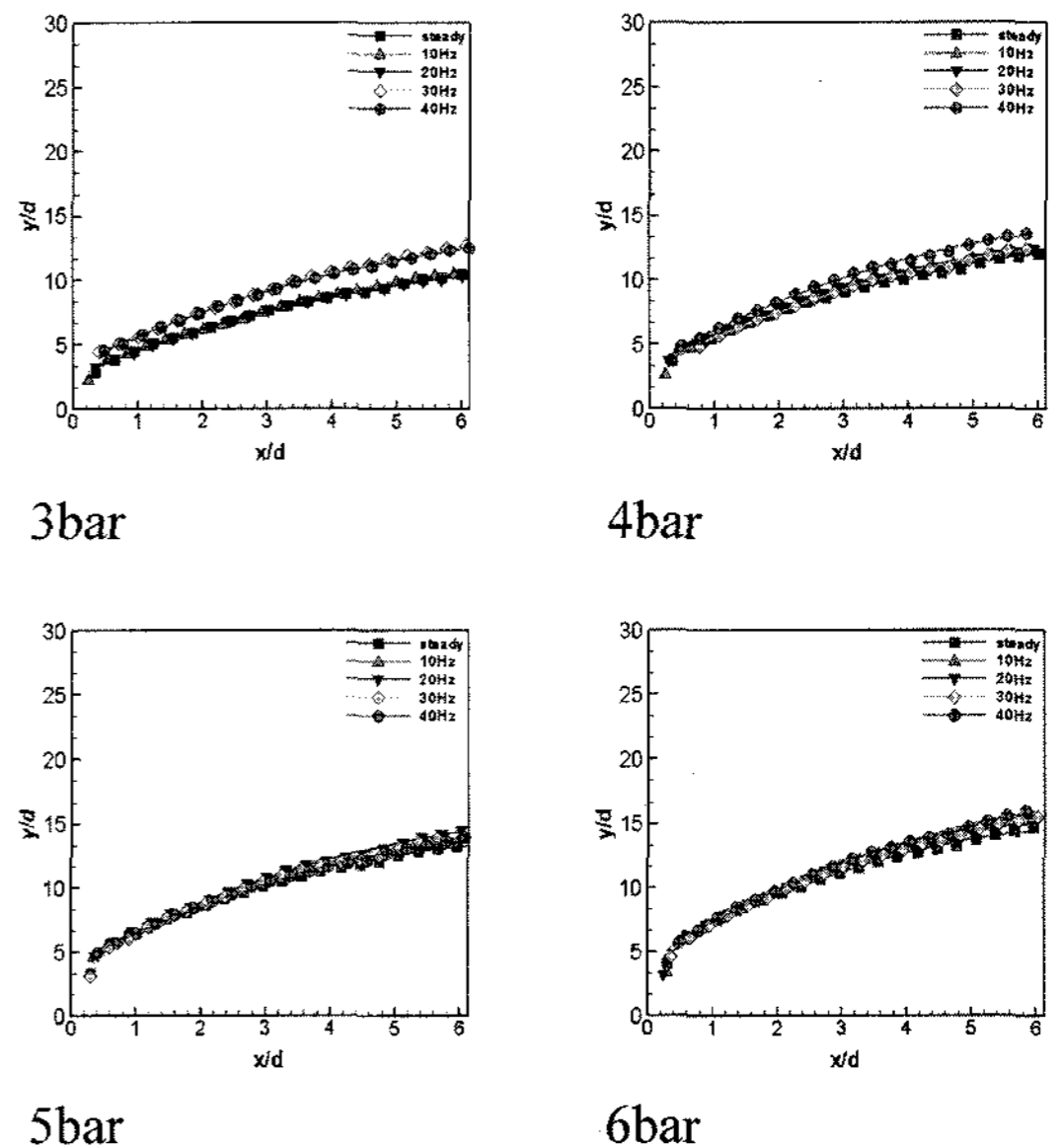


Fig. 11 Penetration of different pressure at 150 m/s air velocity

알 수 있었다.

일반 분무와 가진 분무의 비교를 위하여 고속 카메라를 이용한 분무 촬영을 통하여 얻어진 이미지를 이용하였다. 가진 분무의 경우는 분사의 온 사이클 구간의 정중앙 시간을 기준으로 전후 10장씩을 모아 총 100장을 평균하여, 가진 분무의 완전 발달 분무의 궤적을 측정하였

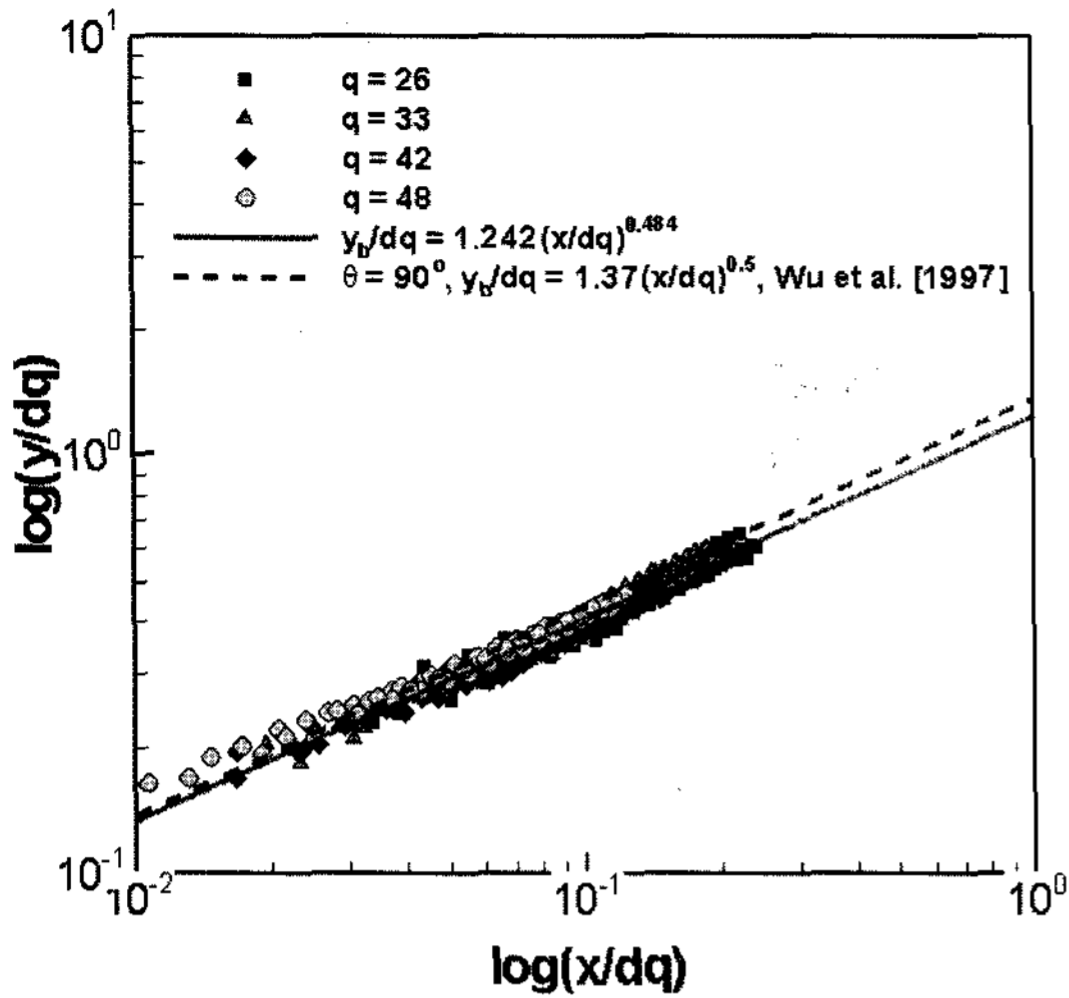


Fig. 12 Normalized penetration at 100 m/s air velocity comparison with Wu *et al.*⁽¹⁾

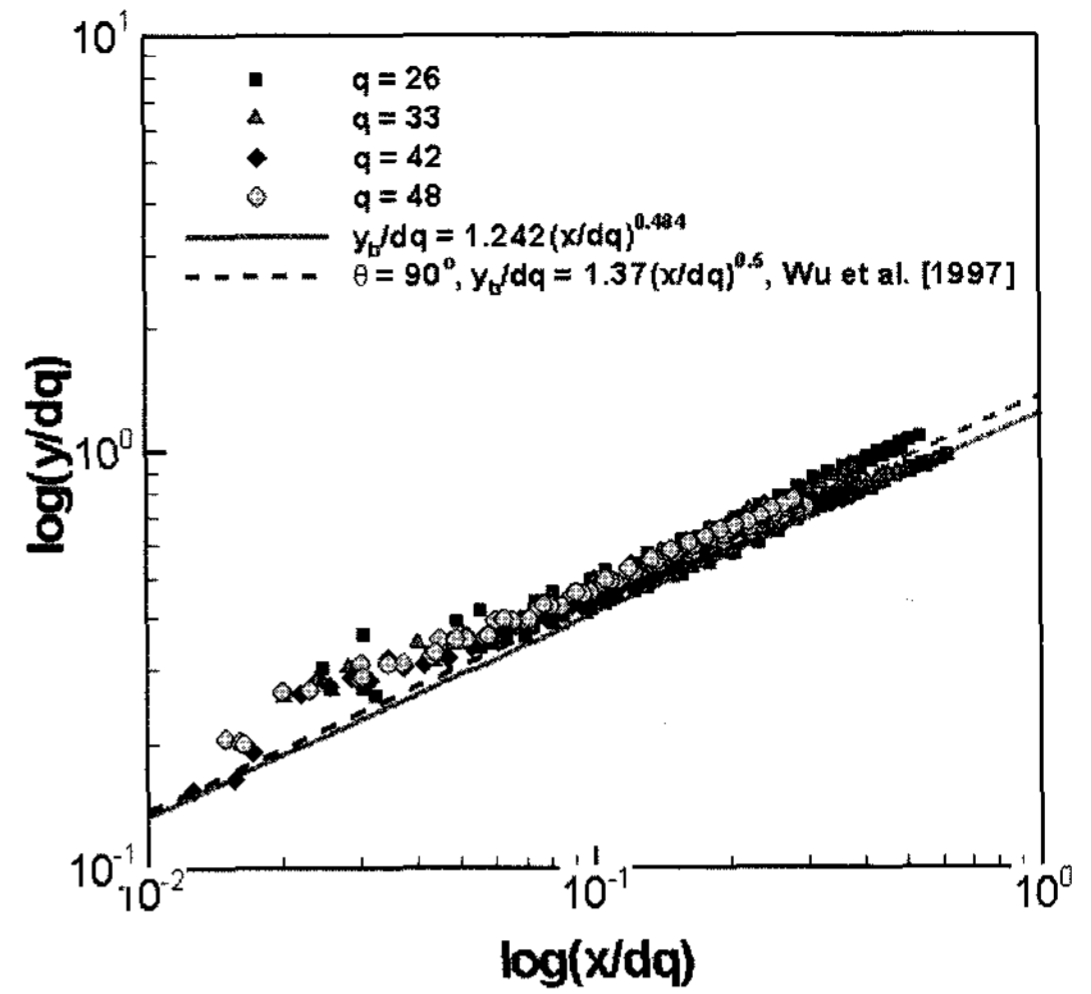


Fig. 13 Normalized penetration at 150 m/s air velocity comparison with Wu *et al.*⁽¹⁾

다. 예를 들어 20 Hz인 경우 온 사이클이 유지되는 시간 인 분사 후 25 ms의 정중앙인 12.5 ms를 전후한 사진들을 평균하여 궤적을 분석하였다. 10, 30, 40 Hz의 경우에도 같은 방법을 통하여 평균된 이미지를 분석하였다.

Figure 10은 상온이며 공기속도 100 m/s에서의 조건에서 분열점 이전까지의 궤적을 비교한 결과이다. 모든 경우 정상 분무에 비해 매우 적은 차이의 큰 침투거리를 보여주며, 이는 액추에이터의 개폐로 인한 압력의 급상승과 하강으로 인한 영향이 유지되고 있는 것으로 생각된다. 하지만 정상 분무와 거의 구별이 되지 않는다고 할 수 있겠다.

Figure 10의 결과와 유사한 방법으로 분석한 Fig. 11는 상온이며 공기속도 100 m/s에서의 조건에서 분열점 이전까지의 궤적을 비교한 결과이다. 이 경우 낮은 분사 압의 경우 정상 분무에 비해 차이가 발생함을 보여주고 있으나, 압력이 높아질수록 그 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 액추에이터의 영향이 압력의 차이에 미치는 영향이 상대적으로 분사차압이 작은 경우에는 크지만, 분사차압이 큰 경우에는 큰 차이가 아니기 때문으로 생각된다.

Figure 12, 13는 100 m/s와 150 m/s의 공기속도 조건에서 수행된 가진 분무의 각 압력에 대한 궤적에 대한 결과분석을 통하여 도출된 궤적 관계식과 Wu 등이 제안한 궤적 관계식과 비교한 결과이다. 도출된 궤적 관계식과 Wu 등이 제안한 일반 분무에 대한 궤적 관계식과 거의 유사한 경향을 보이는 것을 볼 수 있었다. Fig. 10,

11에서 분석한 바와 같이, 완전 발달된 가진 분무의 경우의 궤적 관계식은 정상 분무의 경우와 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 가진 분무의 경우에서도, 동일한 조건에서의 정상 분무의 궤적 관계식을 도입하여 궤적의 위치를 예측하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

실제 램제트 운용조건과 유사한 조건인 고온, 고속의 공기유동에 대한 주 연료 분사에 대해 물과 등유를 사용하여 액주영역에 대한 궤적을 분석하였고, 액체 램제트 엔진에서 발생하는 저주파 연소불안정성을 제어하기 위하여 가진 분무에 대해 액주영역에 대한 궤적을 분석하여 보았다.

1) 연료의 종류나 흡입 공기의 온도와 무관하게, 위와 같은 특성이 반영되는 액체/기체 모멘텀 플럭스 비(q)와 분사 오리피스의 지름에 의해 정상 분무의 궤적이 결정됨을 확인하였다. 이는 수직 분무의 분열 과정이 상호간의 모멘텀 교환에 의한 것임을 반증한다.

2) 연료의 점성에 의한 효과는 궤적에 대해 크게 반영되지 않으나, 액적의 분무화에 영향을 미침을 확인하였다. 점성이 작을수록 미립화가 잘 일어나는 것을 확인하였다.

3) 가진 분무가 완전히 발달한 경우, 가진 분무의 액

주 영역의 궤적은 동일한 분사 조건의 정상 분무의 궤적과 일치함을 확인하였다. 이는 주파수에 대한 영향이 궤적에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 과제 연구지원을 받아 연구 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., Nejad, A. S. "Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 1, 1997, pp.64~73.
- (2) Keith McManus, "Combustion Dynamics and Control in Liquid-Fueled Direct Injection Systems", 38th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, 2000, AIAA 200-1022.
- (3) Langhorne, P. J., Dowling, A. P., Hooper, N., "Practical active control system for combustion oscillations", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 6, No. 3, 1990, pp.324~333.
- (4) Sivasegaram, S., Tsai, R. F., Whitelaw, J. H., "Control of Combustion Oscillations by Forced Oscillation of Part of the Fuel Supply" *Combustion Science and Technology*, Vol. 105, Issue 1-3, 1995, pp.67~83.
- (5) Richards, G. A. and Janus, M. C., "Characterization of oscillations during premix gas turbine combustion", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 120, April 1998, pp. 294~302.
- (6) Jones, C. M., Lee, J. G., Santavicca, D. A., "Closed-Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No.4, 1999, pp.584~590.
- (7) Johari, H., Pacheco-Tougas, M., and Hermanson, J. C., "Penetration and Mixing of Fully Modulated Turbulent Jets in Crossflow", *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 7, 1999, pp. 842~850.
- (8) Eroglu, A., and Breidenthal, R. E., "Structure, Penetration, and Mixing of Pulsed Jets in Crossflow", *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 3, 2001, pp. 417~423.
- (9) McCloskey, R. T., King, J. M., Cortelezzi, L., and Karagozian, A. R., "The Actively Controlled Jet in Crossflow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 452, 2002, pp. 325~335.
- (10) Stenzler, J. N., "Modulated Liquid Jets in a Crossflow for Active Combustion Control", Ph.D thesis, Pennsylvania State University, 2005.