

수직분사제트에서 다양한 분사각도의 분무궤적 특성에 대한 실험적 연구

김민기* · 송진관** · 황정재** · 윤영빈***

An Experimental Study on the Trajectory Characteristics of Liquid Jet with Canted Injection Angles in Crossflow

Min-Ki Kim* · Jinkwan Song** · Jeongjae Hwang** · Youngbin Yoon***

ABSTRACT

The liquid column and spray trajectory have been experimentally studied in liquid jets injected into subsonic crossflow. With water as fuel injection velocity, injection angle were varied to provide of jet operation conditions. The Pulsed Shadowgraph Photography and Planar Liquid Laser Induced Fluorescence technique was used to determine the injection characteristics in a subsonic crossflow of air. And the mainly objectives of this research was to get a empirical formula of liquid column and spray region trajectory with forward and reversed injection of air stream. As the result, This research has been shown that each trajectories were spatially dependent on air-stream velocity, fuel injection velocity, various injection angle, and normalized injector exit diameter. Furthermore, the empirical formula of liquid column trajectories has been some different of drag coefficient results between forward and reversed angled injection.

초 록

횡방향으로 유입되는 공기유동에서 연료 제트의 액주 및 액적영역의 궤적에 관한 연구를 수행하였다. 실험방법으로는 직접사진촬영방법과 평면레이저유도형광 기법을 사용하여 분석하였다. 본 연구의 목적은 공기유동 방향에 수직으로 분사되는 분무와 분사각도의 분무에서 궤적에 대한 경험식을 도출하여 기존 연구결과와 비교분석하고, 대향분사에서의 궤적에 대한 경험식을 도출하는데 있다. 실험을 통하여 액주 및 액적 영역의 궤적은 연료분사차압, 공기의 유속, 분사기 지름 크기, 분사각도에 의하여 결정되며, 정방향의 분무와 대향분사 결과에 있어서는 실험식 상수의 차이가 있음을 확인하였다.

Key Words: Transverse Injection(수직분사), PLLIF(Planar Liquid Laser Induced Fluorescence ; 평면 레이저유도형광법), Angled Injection(분사각도 분사), Reversed Injection(대향분사)

† 2008년 10월 2일 접수 ~ 2008년 12월 3일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

*** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기

술연구소(AAAT)

연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

1. 서 론

횡방향으로 유입되는 공기유동에 수직으로 분

사하는 액체연료 제트는 빠른 속도의 공기유동에서 연소하여 작동하는 램제트 엔진이나 스크램제트 엔진, 가스터빈 엔진의 후기연소기(after burner)등 공기를 산화제로 사용하는 추진체의 연료 분사장치로 사용되며, 이외에도 항공기 엔진의 성능향상 및 안정성을 위한 유동제어용 노즐, 터빈블레이드 등의 막냉각, 능동적으로 연소 불안정성을 보정하기 위한 2차 연료 분사장치 등에 이용된다. 일반적으로 횡단류 유동에 수직으로 분사되는 연료의 분무 구조는 세가지 영역으로 정의할 수 있다. 초기 분사 직후 분사기 노즐 크기에 비례하여 유지되는 액주영역(liquid column region), 분열이 시작되어 후류의 액적보다 다소 큰 액적이 존재하게 되는 고리영역(ligament region), 이후 작은 액적으로 미립화되는 액적영역(spray plume region, droplet)으로 나눌 수 있다[1]. 횡단류에 분사된 액체제트의 선단에서는 유체 유동이 지연되고 압력이 상승하며, 액체제트의 후단에서는 양단에서 서로 반대 방향으로 회전하는 와류(vortices)를 형성하며 동시에 횡단류는 액체제트의 주위 가장자리에 전단력을 주어 액체가 분열되고, 잘게 부서지는 미립화 현상이 나타난다[2]. 수직분사제트에서 액주 영역에서의 침투거리와 궤적은 분무의 분포에 큰 영향을 미치게 되는데, 이에 대하여 많은 연구자들이 연구를 수행하였다. Schetz 등[3]은 최대 침투 높이에서의 모멘텀 해석을 수행하여, 최대 침투 높이는 액체 제트 분사 모멘텀 플럭스를 공기흐름 방향으로 전환하는데 필요한 거리라고 언급하였다. 침투 높이는 노즐 지름의 약 6.25배이며, 액체/기체 모멘텀 플럭스 비에 관계된다고 하였다. Wu 등[4]은 액주영역에서의 궤적을 힘의 평형 이론을 통하여 분석하였으며, 공력학적 항력에 의해 액주가 받게 되는 힘이 액주의 궤적을 결정한다는 가정을 바탕으로 공기유동과 분사된 연료제트의 모멘텀 비(q)와 항력 계수(C_D)의 관계식으로 표현하였다. 이와 유사하게 Fuller 등[5]은 다양한 분사각도를 가진 수직분사제트에서 액주영역의 궤적 방정식을 Wu와 동일한 방법으로 유도하여 관계식을 도출

하였으며, 액주 분열의 위치의 연구에서는 각각의 분사조건 및 분무각도에 따라 고속으로 흐르는 공기에 의해서 분열되는 공력학적 분열(aerodynamic breakup)과 공기의 흐름에 영향을 크게 받지 않고 제트 자체가 가지고 있는 관성의 힘과 난류효과에 의해 분열되는 비공력학적 분열(Non-aerodynamic breakup)의 비율로 상수로 breakup regime parameter를 정의하고, 이를 포함하여 분열지점까지의 관계식을 유도 하였다. 또한 Costa 등[6]은 다양한 분사각도에서 분무특성과 PDA기법을 통하여 액적영역의 액적의 크기와 액적의 속도에 대하여 연구하였다. 지금까지 언급된 연구결과들은 모두 액주영역에 대하여 연구된 것이며 궤적을 계산할 때의 인자를 동일한 조건으로 한정하기 위하여 모두 정상유동 상태에서만 실험을 수행한 결과이다. 분열된 지점 이후의 액적 영역에서도 많은 연구들이 수행되었다. 액적영역은 액주영역과 연관이 되어 있고, 액적의 크기, 분무의 너비, 침투거리의 유지 유무 및 액적 영역의 궤적이 실제 연소에 상당히 중요한 인자로 작용하므로 다양한 엔진에서 연구가 되고 있다. Inamura와 Nagai 등[7]은 1mm, 2mm의 물 제트의 분무 특성에 대하여 표본 추출 프로브(sampling probe)와 PDPA를 사용하여 연구하였다. Oda 등[8]은 액적의 질량 플럭스와 크기를 표본 추출 프로브와 빛 산란 방법(light scattering method)을 이용하여 연구하였다. 그리고 분열 모델을 선형 파동 분석(linear wave analysis)을 이용하여 구성하였다. Tamaki 등[9]은 분사기 내부유동 현상이 분열 및 분무 특성에 큰 영향을 주는 것으로 보고하였으며, Ahn 등[10]은 실제로 분사기 내부에 교란이 발생하게 되었을 때 액주영역 궤적과 액주 분열거리에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그리고 캐비테이션이나 수력 튀김 현상이 발생한 경우 유효 지름이나 유효 속도를 고려하여야 함을 제안하였다. 이에 본 연구에서는 내부유동이 정상인 분사기군에서 액주와 액적영역의 궤적의 연구를 위하여 고 정밀도의 직접사진촬영기법과 평면레이저유도형광기법을 통해 서로의 결과를

비교하고, 다양한 분사각도 분무에서 액주영역에서의 궤적과 대향분사시의 궤적 및 분무 특성에 대하여 논의하였다.

2. 실험방법

2.1 연료 인젝터(injector) 설계

분사기의 출구 지름(d)은 0.5mm로 고정하였으며, 내부는 오리피스와 챔버로 이루어졌다. 챔버의 지름(D)은 12mm로 $D/d=24$ 이다. 여기서 오리피스 길이(L) 대 지름 비(L/d)에 의해 분사기 내부유동의 종류가 결정이 되는데, 본 연구에서는 캐비테이션이나 수력튀김 현상과 같은 분사기 내부유동에 대한 영향을 고려하지 않았으므로 곡률은 유입구의 반경(R)과 오리피스의 지름이 같은 $R/d=1$ 로 하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 분사기이며, 분사각도에 의한 분무특성을 확인하기 위하여 30° , 60° , 90° , 120° , 150° 등 다양한 오리피스를 제작하여 실험을 진행하였다.

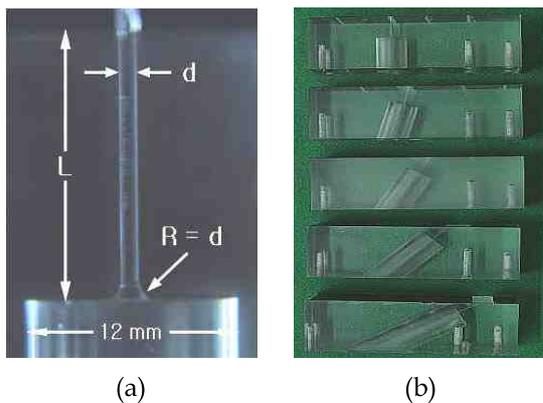


Fig. 1 Injector Shape: (a) round-edge orifice [$L/d=20$], (b) view of angled orifices

2.2 실험조건 및 장치

Figure 2와 Table 1에서의 실험 장치와 조건과 같이 분사기의 분사각도를 변화시킨 실험을 수행하기 위해 다양한 각도로 기울여진 분사기에 대해서 실험하였고, 이를 정상유동의 조건으로 제한시켰다. 공기의 유속은 60m/s로 일정하

게 유지하였고, 공기의 온도는 300K이다. 액체/기체 모멘텀 플럭스 비를 변화시키기 위해서 공기의 속도는 일정하게 유지하고 분사압력 차이를 1bar에서 5bar까지 변화시키며 실험하였다. 분무의 분포 및 액주와 액적영역의 궤적을 측정하기 위해 레이저를 반경방향으로 주사하고, 수직방향으로 주사하여 2가지 방법의 평면레이저 유도형광(PLLIF) 실험을 수행하였다. 실험연료는 물과 에탄올을 혼합한 용액을 사용하였다. 평면레이저 유도형광 실험의 경우 형광신호를 확보하게 되는데, 물이 실험연료인 경우 형광을 발하지 않기 때문에 물에 염료를 혼합하기 위해서 물과 에탄올을 4대 1로 혼합하여 실험을 수행하였다. 평면 레이저 유도형광 실험을 위한 염료로는 Aldrich F245-6을 사용하였다. 이 연료는 온도 조절이 가능하도록 제작된 실린더에 채워서 실험을 수행하였다. 실린더는 온도 센서를 부착하였고, 이 센서에 의해 측정되는 온도를 기준으로 PID 조절기로 원하는 온도로 가열할 수 있도록 설계되었다. 실린더에 걸리는 압력은 레귤레이터에 의해 조절되었다. 실험 장치는 크게 공기를 풍동에 공급하는 공기유입 시스템과 평면레이저유도형광 실험을 수행하기 위한 레이저 평면광 시스템, 그리고 직접사진촬영 기법을 위한 카메라 시스템으로 구성되어 있다. 시험부에 60m/s의 유량을 일정하게 공급할 수 있도록 20마력의 송풍기를 사용하였다. 또한 이를 blockage orifice와 레이저 속도 측정 기법인 PIV 기법을 통하여 정확한 속도를 측정하여 고정하였다. 공기의 속도를 균일화하기 위하여 파이프 내에는 벌집구조를 넣어 조립하였다. 가동 시간은 무한히 가능하나, 오랜 시간 가동을 지속하는 경우 공기의 온도가 상승하는 단점이 있기 때문에 15~20분을 가동한 후 10분을 휴지 후 실험을 반복하였다. 평면 레이저 유도형광 실험을 수행하기 위해서는 형광신호와 산란신호를 측정해야 하는데, 이를 위해 본 실험에서는 LEXEL의 아르곤-이온 레이저를 사용하였으며, 아르곤-이온 레이저에서 주사된 빔은 Dantec의 Fiber-optics를 사용하여 평면광으로 전환하였다. 평면 레이저

유도형광 기법을 통하여 얻은 형광신호와 산란신호를 DSLR 카메라로 측정하였다. Canon EOS 20D에 28-105mm 표준 렌즈를 장착하고 이미지의 확대를 위하여 vivitar의 2x 확대 렌즈를 장착하여 이미지를 크게 확대하였다. 그리고 양쪽의 카메라 각각에 550nm 하이패스 필터와 514±5nm 밴드패스 필터를 장착하여 형광신호와 산란신호를 얻었다. 또한 분사 제트를 고 확대비의 직접사진촬영기법으로 고 정밀의 촬영이 가능한 Canon EF 100mm f/2.8 Macro USM 렌즈를 사용하여 액주영역의 궤적을 촬영하였고, 고 확대비의 촬영이 가능한 Canon MP-E 65mm f/2.8 1-5x Macro Photo 접사렌즈를 이용하여 분열지점에 대한 이미지를 촬영하였다. 사진은 디지털 카메라(Canon EOS 20D)와 광원인 스트로보스코프를 동기화하여 촬영하였고, 확대비는 pixel당 약 2~10 μ m 정도이다. 액주영역의 분무궤적과 분열지점까지 거리는 각각 1000~3000장의 사진을 평균한 결과로 실험오차의 범위를 최소화 하였다[11].

Table 1. Experimental Conditions

Parameter	value
Air velocity	60 m/s
Air temperature	300 K
Fuel temperature	318 K (45 °C)
Fuel	Water : Ethanol = 4 : 1 (20 %)
Orifice diameter	0.5 mm
Orifice shape	Round edged (L/d=20)
ΔP (bar)	1, 2, 3, 4, 5
x/d	40, 60, 80, 100, 120
Injection angle	30°, 60°, 90° (normal injection) 120°, 150° (reversed injection)

3. 실험결과 및 토의

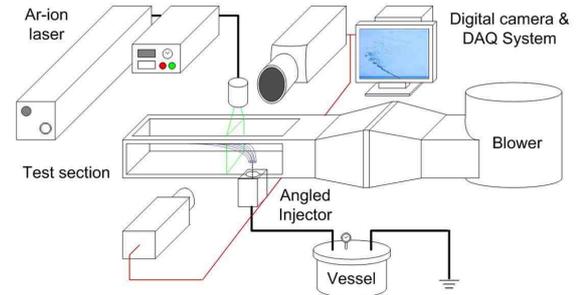


Fig. 2 Experimental Apparatus for direct photography and PLLIF measurement

3.1 분사각도 분무에 대한 특성

내부유동의 특성 즉, 캐비테이션이나 수력튀김의 현상이 발생하지 않는 정상유동의 분사기군에서 분사각도의 변위를 가지는 인젝터를 제작하여 노즐 출구의 면을 기준으로 30°, 60°, 90°, 120°, 150°의 각도를 가진 수직분사제트의 분무특성에 대한 연구를 하였다. 실험의 공기속도는 변위 없이 60 m/sec로 고정을 시키고, 연료(물+에탄올)의 분사차압을 1~5 bar 즉, 액체/기체 모멘텀 플럭스 비 q 의 값을 21~105로 변화시키면서 분사제트의 액주영역과 액적영역의 분무특성에 대하여 연구하였다. 실험은 축방향으로 레이저를 조사한 평면 레이저 유도 형광기법과, 액주영역의 확대 촬영으로 궤적에 대해서 연구하였다. 또한 PLLIF의 산란신호는 액적에 비례하여 산란하기 때문에 이를 통하여 액주영역과 액적영역의 분열지점의 위치를 재차 확인하였다. Fig. 3은 각각의 분사차압이 $\Delta P=3$ bar의 경우, $q=65$ 의 경우에서 분사각도에 따른 액주영역의 확대 사진이다. 이와 같이 90°이전의 각도에서나 대향분사의 분무에서 q 값이 증가할 수 록 분사되는 제트의 속도가 증가하게 되므로 횡단류의 공기 유동장으로의 침투거리가 커지게 됨을 확인할 수 있었다. 90°이전의 각도영역에서 분사각도가 작아질 수 록 액주는 더욱더 끈게 되고, 그 래프에서와 같이 침투거리는 다른 각도의 분사보다 작아지게 된다. 따라서 액주 표면의 전단응력이 상대적으로 작아지게 되므로 다른 각도에 비해 미립화 성능이 나빠지게 된다.

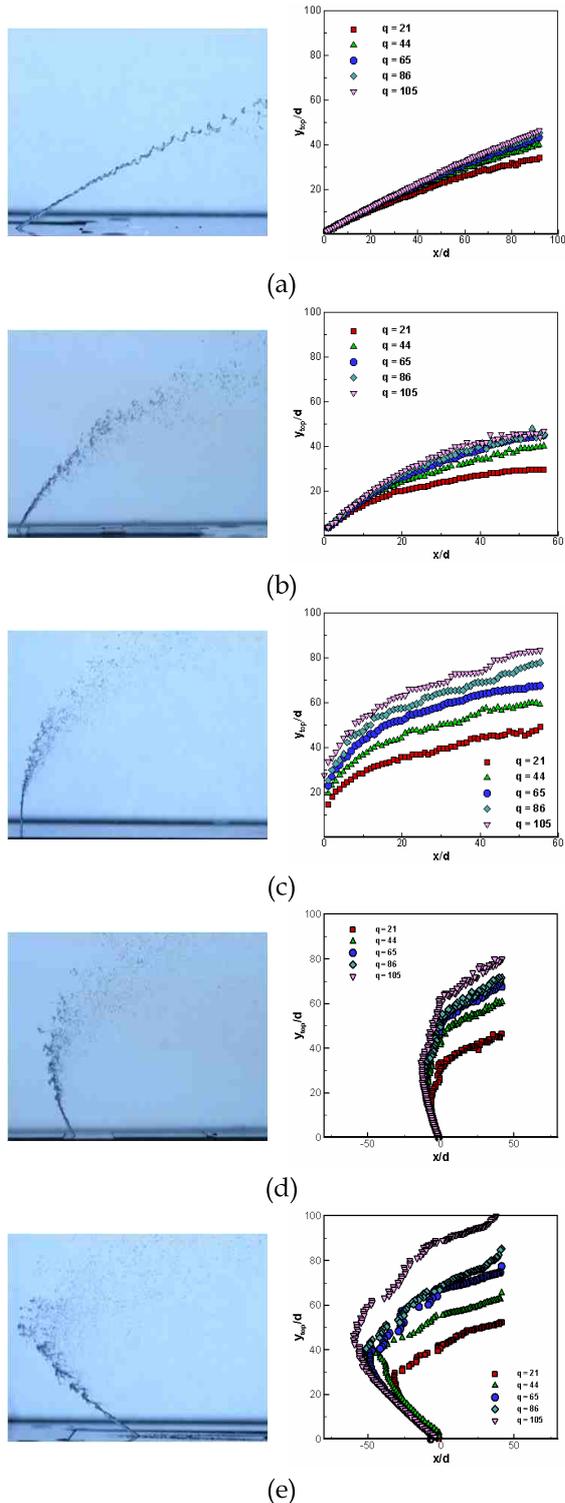


Fig. 3 Spray patterns and trajectory results at various angled injection ($\Delta P=3\text{bar}$, $q=65$); (a) 30°, (b) 60°, (c) 90°, (d) 120°, (e) 150° injection

저각에서의 분사제트의 속도는 불어오는 공기의 속도와 거의 유사하게 진행하게 되므로 공기에 의한 분열보다는 제트의 액주가 가지는 자유진동에 의한 파장과, 관성력, 자체 난류의 효과로 분열되는 힘이 커지게 된다. 또한 액주의 분열이 주기적으로 분열된다. 2000년 Fuller [5] 등은 수직분사제트의 침투거리를 결정하는 인자를 분사각도와 q 라고 언급하였다. 또한 낮은 q 영역에서 액주는 큰 wave를 가지며, 이로 인해 액주 표면이 뒤틀리고, 꼬임 현상으로 분열된다고 언급하였다. 이를 chigier 와 Reitz 등은[12] fiber-type의 분열이라고 소개하였다.

3.2 평면레이저유도형광 기법에 의한 실험결과

평면레이저를 축방향과 반경방향으로 주사하여 PLLIF실험의 사진을 Fig. 4와 같이 획득하였다. 좌표축에 대하여 spray plume분무의 이미지는 강도의 총합에 대하여 90%의 강도의 합에 대한 영역을 기준으로 삼고 그 영역에 대하여 이미지의 가장 높은 위치, 즉 최대 침투거리(y_t)와 이미지에서 가장 밝은 강도를 보이고 있는 최대 질유량이 지나가고 있는 위치(y_m)에서의 궤적을 분석하였다. 1998년 Wu 등은[13] 정상유동의 액적영역에 대해서 궤적을 Eq. 1, 2와 같이 진행방향의 거리(x) 및 최대 침투거리와 최대 질유량의 높이에 따라 정의하였다. 이에 본 연구에서 정상유동 분사기의 결과에 대하여 Wu등이 제안한 궤적식과 비교하여 보았다.

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

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

Fig. 5는 Wu의 연구와 같은 90°분무에서의 실험식을 비교한 그래프이다. 축방향 PLLIF 실험의 결과로 얻은 궤적을 비교해보면 Wu등의 실험 조건은 $q=5.8\sim 58$ 인데, q 가 21, 44인 실험 결과는 상당히 일치함을 확인할 수 있었다. 반면 실험 조건에 부합하지 않는 $q=65$ 이상에서는 잘 맞지 않는 것을 확인할 수 있었다. Wu의 궤적

분석에서 액주와 액적영역의 차이는 항력을 받은 물체의 형상에 있어 그에 대한 항력계수를 사용한다고 고려하여 액체의 점성이나 We수가 동일하게 유지될 경우 분사기의 지름 d와 모멘텀 플럭스 비 q가 분무 분포를 결정한다는 시각에서 시도했다.

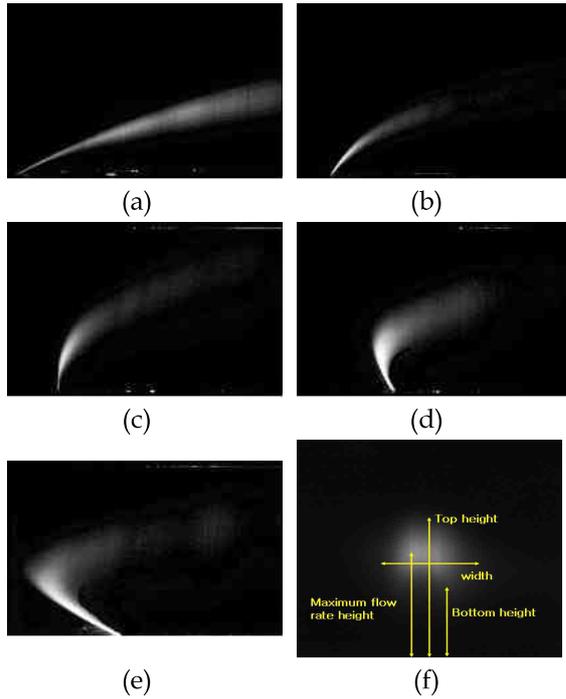


Fig. 4 LIF images by PLLIF measurement ($\Delta P=3$ bar, $q=65$); (a) 30°, (b) 60°, (c) 90°, (d) 120°, (e) 150° injection, (f) spray plume structure

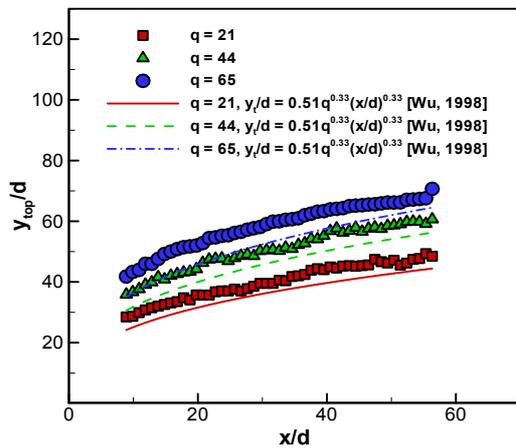


Fig. 5 Results of axial PLLIF measurement

Fig. 6은 정상유동 조건, 90°분사에서 레이저를 반경방향과 축방향으로 조사한 PLLIF실험에서의 결과를 비교한 그래프이다. 축방향 실험의 최대 침투 높이의 결과를 사각형 기호로, 최대 질유량 높이의 결과를 원형기호로 표시하였다. 또한 반경방향의 결과를 각각 실선과 dot점선으로 표현하였다. 최대 침투높이에 대한 액적영역의 궤적식을 비교하여 보면 Eq. 3에서의 상수 값(C)의 차이를 제외하고 비교적 일치 한다. 이는 분사기의 가공오차와 유량의 오차로 인한 상수 값의 차이로 생각할 수 있다. 또한 최대 질유량의 높이에 따른 액적영역의 궤적은 다소 차이가 있음을 확인할 수 있는데, 이는 축방향의 레이저 조사에 따른 레이저의 강도 감쇠 및 spray plume에 비해 비교적 좁은 영역을 촬영, 이미지의 후처리 과정에서 threshold값의 오차인 것으로 생각한다. 축방향 PLLIF 측정방법에 따른 각각의 높이에 대하여 Eq. 4와 5의 관계식을 얻을 수 있었다.

$$\frac{y}{dq} = C \left[\frac{x}{dq} \right]^n \quad (3)$$

$$y_t/dq = 1.34 (x/dq)^{0.50} \quad (4)$$

$$y_m/dq = 1.1 (x/dq)^{0.50} \quad (5)$$

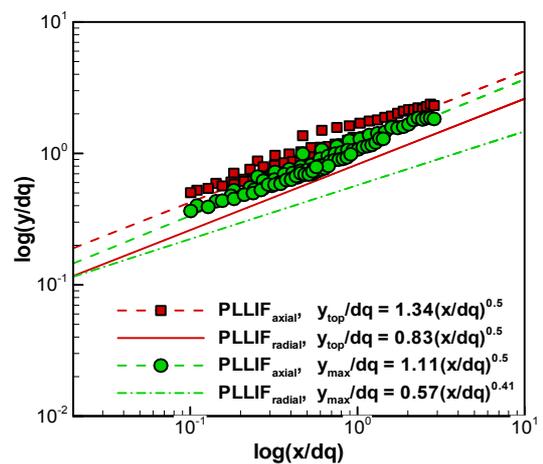


Fig. 6 Comparison with axial and radial PLLIF experimental study results

3.3 액주영역의 분무계적

Wu와 Fuller등은 액주영역의 궤적을 힘의 평형 자유물체도에서 유도하였다. Eq. 6은 분사각도에 따른 액주영역의 궤적에 대한 관계식이다.

$$\frac{x}{d} = \frac{1}{\pi} \frac{C_D}{q \sin^2 \theta} \left(1 - \frac{v_f \cos \theta}{u_a} \right)^2 \left(\frac{y}{d} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \left(\frac{y}{d} \right) \quad (6)$$

이 식에서 액주영역의 궤적은 항력계수에 의해 결정됨을 알 수 있다. Fuller등은 항력계수 C_D 의 결정을 90° 이전의 각도에서 실험한 결과와 힘의 평형으로 유도된 식으로부터 얻은 이론값의 비교로 잘 맞는 구간의 항력계수 값을 정의하였다. 그리하여 모든 실험 영역에서 30% 오차에 들어오는 범위를 설정하고, $C_D=4.4$ 의 값을 얻었다. Fig. 7은 본 실험에서 90° 의 분사각도 이전에서 실험한 액주의 궤적에서 실험값과 이론값을 비교하여 얻은 항력계수이며, 이를 Wu와 Fuller의 연구에 비교해 보았다. 본 실험 결과는 30° , 60° , 90° 의 실험으로 모든 실험영역에서 5.7% 오차 안으로 들어오는 항력계수의 C_D 값을 1.3으로 얻을 수 있었다. 1997년 Wu 등은 90° 분사에서 연료의 종류, 오리피스 지름, 공기속도를 변수로 획득한 분무 이미지의 액주영역 궤적으로부터, 항력계수의 값을 1.7로 결정하였다. 본 실험으로부터 결과는 Fuller가 제안한 항력계수의 값보다 Wu 등의 실험과 어느 정도 일치하는 결과를 보이고 있다. 이는 본 실험의 q 의 조건과 연료의 종류가 Wu 등의 실험과 유사하여 계수의 값이 유사함을 생각해 볼 수 있다. 또한 각각 실험 환경의 오차, 분사기 가공의 오차, 분사기 passage length의 오차, 액주의 굵기의 차이에 의해서 항력계수 값의 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서의 액주영역 Re 값이 $5000 \leq Re_{fd} \leq 15000$ 으로 매끈한 원형 실린더에서 대략적인 항력계수 값이 1~1.5이므로 어느 정도 일치함을 알 수 있다. Fig. 8은 분사각도가 90° 이후의 액주영역의 궤적식의 항력계수를 결정한 그래프이다. 대향분사 실험에서 얻은 실험값과 Eq.

6의 이론값을 비교하여 항력계수를 결정하였다. 그리하여 최종적으로 Eq. 7, 8과 같이 분사각도가 90° 이전의 정방향분사와 대향분사의 액주영역 궤적 실험식을 도출하였다. 아래의 경험식에서는 각각 계수의 차이를 보이며 이는 정방향분사와 대향분사의 공력학적 특성에 의한 영향의 차이로 발생한다.

$$\frac{x}{dq} = \frac{1}{\pi} \frac{1.3}{\sin^2 \theta} \left(1 - \frac{v_f \cos \theta}{u_a} \right)^2 \left(\frac{y}{dq} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \left(\frac{y}{dq} \right) \quad (7)$$

$$\frac{x}{dq} = \frac{1}{\pi} \frac{0.2}{\sin^2 \theta} \left(1 - \frac{v_f \cos \theta}{u_a} \right)^2 \left(\frac{y}{dq} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \left(\frac{y}{dq} \right) \quad (8)$$

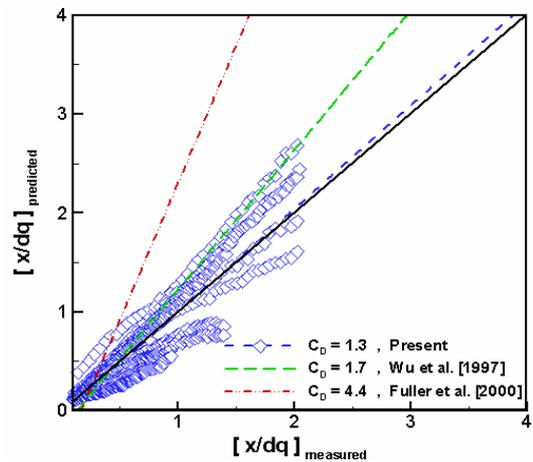


Fig. 7 Results of drag coefficient(C_D) in normal injection ($\theta \leq 90$)

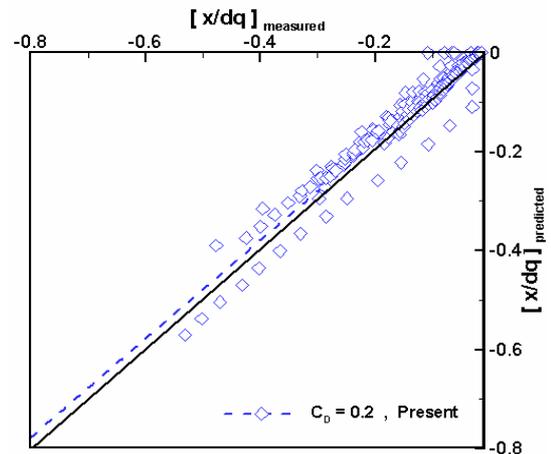


Fig. 8 Results of drag coefficient(C_D) in reversed injection ($\theta > 90$)

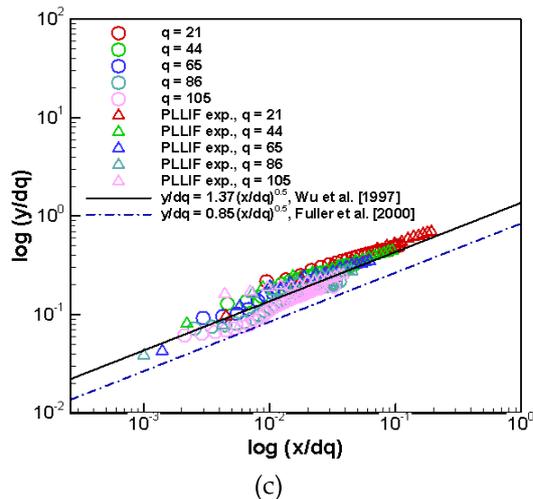
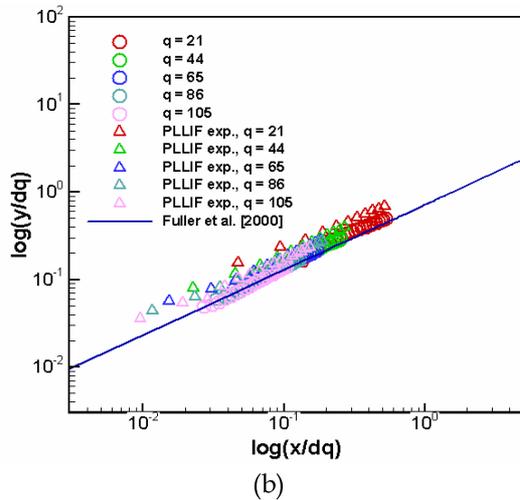
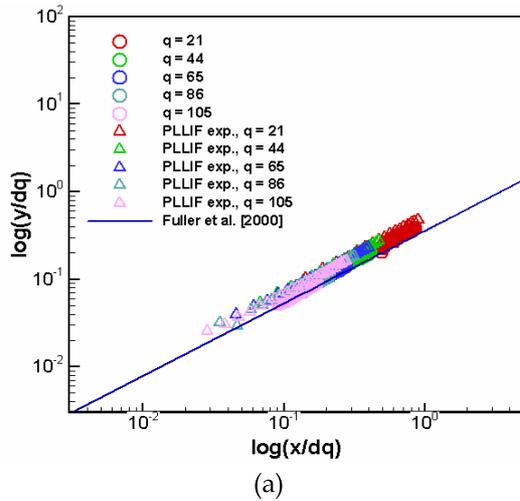
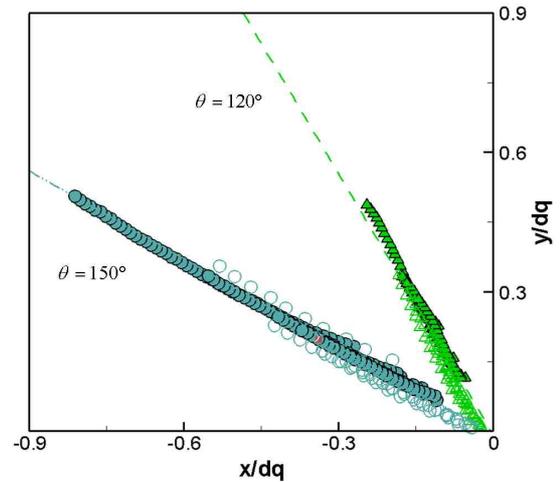


Fig. 9 Comparison with previous and present correlated trajectory results at normal injection ($\theta \leq 90^\circ$); (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° injection



- ▲ $\theta = 120^\circ$, Direct Photography
- △ $\theta = 120^\circ$, PLLIF
- - - $\theta = 120^\circ$, $C_D = 0.2$
- $\theta = 150^\circ$, Direct Photography
- $\theta = 150^\circ$, PLLIF
- · - · - $\theta = 150^\circ$, $C_D = 0.2$

Fig. 10 Results of correlated trajectory at reversed injection ($\theta > 90^\circ$)

Fig. 9(a)는 실험적으로 얻은 액주영역의 궤적을 30° 의 분사각도를 가진 분사기군의 직접사진 촬영기법에 의한 실험값과 평면레이저유도형광 기법에 의한 결과를 Fuller의 결과와 비교한 값이다. 마찬가지로 Fig. 9(b)는 분사각도가 60° 인 실험에서의 측정값과 이전 연구결과의 비교한 그래프이다. 그림에서와 같이 30° 와 60° 의 경우는 Fuller의 결과와 약간 차이를 알 수 있는데, 이는 이전에 언급하였던 항력계수의 차이로 다소 차이가 있는 것으로 확인할 수 있다. Fig. 9(c)는 90° 의 분사각도를 가진 분사기군에서 측정된 실험값과 이전 연구결과의 비교 그래프이다. 마찬가지로 각각 실험의 항력계수 차이로 Wu와 Fuller, 현재의 연구가 다소 차이를 보이고 있고, 본 실험은 Wu의 항력계수와 비슷하기 때문에 실험 결과들의 분포도 역시 거의 비슷한 값을 가지게 되는 것을 확인할 수 있다. 추후 90° 이전

의 일반분사의 경우에서 45°, 75°의 분사에 따른 실험값을 추가하여 도출된 실험식의 검증을 시행할 예정이다. Fig. 10은 대향분사의 실험으로부터 얻은 액주영역 궤적 실험식을 각각의 각도별의 데이터와 비교한 그래프이다. 대향분사의 실험식의 경우 항력계수가 0.2일 때 120°와 150° 분사기의 실험값과 잘 맞는 것을 확인할 수 있으며, 향후 동일한 조건에서 105°, 135°등의 실험을 추가로 대향분사의 실험식을 검증할 예정이다.

4. 결 론

분사각도에 의한 수직분사제트에서 분무특성에 대한 액주 및 액적영역 궤적의 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 실험을 통하여 액주영역의 궤적은 연료분사 속도, 공기의 속도, x축, y축 방향 대 분사기 출구 지름비(x/d , y/d)와 분사각도(θ)의 함수임을 확인하였다.

(2) 평면레이저유도형광실험으로 얻은 액주영역과 액적영역의 궤적 결과는 이전 연구결과와 상당히 유사함을 확인하였으며, 실험유체 및 조건에 따라 영향을 받음을 확인하였다.

(3) 분사각도에 의한 액주영역의 궤적 실험식을 도출하였으며, 일반적인 공기유동 방향과 일치하는 정방향에 대한 액주궤적 실험식과 공기유동 방향과 반대방향으로 분사되는 대향분사 액주궤적 실험식과는 항력계수라는 상수의 값이 차이가 있고, 경험식과 각 분사각도에서의 실험값은 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 서인천 발전본부 중장기 기술과제 "가스터빈(GE7FA DLN-2.6) 연소기의 연소불안 정성 제어기법 개발"과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

Nomenclature

C_D : 항력계수

d : 오리피스 출구 지름

θ : 분사각도

L : 오리피스의 길이

q : 연료/공기모멘텀플럭스비 $\rho_f v_f^2 / \rho_a v_a^2$

∇P : 분사차압 $P_1 - P_2$

참 고 문 헌

- Schetz, J.A. and Padhye, A., "Penetration and Breakup of Liquids in Subsonic Airstreams", AIAA Journal, 15, 1385-1390, 1977
- Fric, T.F. & Roshko, A. "Vortical structure in the wake of a transverse jet.", J. Fluid Mech. 279, 1-47., 1994
- Schetz, J. A., Kush, E. A., Joshi, P. B., "Wave Phenomena in Liquid Jet Breakup in a Supersonic Crossflow," AIAA Journal, Vol. 18, No. 7, 1980, pp.774-778
- 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, 1997, pp.64-73
- Fuller, R. P., Wu, P. -K., Kirkendall, K. A., and Nejad, A. S., "Effects of Injection Angle on Atomization of Liquid Jets in Transverse Airflow," AIAA Journal, Vol. 38, No. 1, 2000, pp.64-72
- Costa, M., Melo, M. J., Sousa, M. M., and Levy, Y., "Spray Characteristics of Angled Liquid Injection into Subsonic Crossflow," AIAA Journal, Vol. 44, No. 3, 2006, pp. 646-653
- Inamura, T. and Nagai, N., Spray

- Characteristics of Liquid Jet Traversing Subsonic Airstreams, *Journal of Propulsion and Power*, 13(2): 250-256, 1997
8. Oda.T. and Hiroyasu.H., breakup Model of Liquid Jet Across a High-Speed Air Stream, *Proceeding of the 9th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (San Francisco, CA)*, : 99-103 , 1996
 9. 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
 10. K. Ahn, J. Kim, Y. Yoon, "Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows: Cavitation and Hydraulic Flip," *Atomization and Sprays*, Vol.16, No.1, 2006
 11. Lefebvre. A. H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corp. Philadelphia, 1989.
 12. Chigier,N., Reitz,R.D., *Regimes of Jet Breakup and Breakup Mechanisms, Spray Atomization and Drop Burning Phenomena Vol. 1*, edited by K. Kuo
 13. 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
 14. 김정훈, 안규복, 윤영빈 "아음속 유동장에 수직분사시 오리피스 내부유동 효과에 대한 연구," *한국추진공학회지*, 제7권, 제1호, 2003, pp.28-39