

아음속 유동장에 수직분사시 오리피스 내부유동 효과에 대한 연구

김정훈* · 안규복* · 윤영빈*

Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows

Junghoon Kim* · Kyubok Ahn* · Youngbin Yoon*

ABSTRACT

Effects of the orifice internal flow such as cavitation and hydraulic flip on transverse injection into subsonic crossflows have been studied. The liquid column breakup length and the liquid column 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, and were compared with previous results. It is found that cavitation bubbles, which occur inside the sharp-edged orifice, make the liquid jet very turbulent and especially in the orifices with $L/d = 5$ hydraulic flip appear as cavitation bubbles are emitted from the orifice. The breakup length is shorter as cavitation bubbles grows and hydraulic flip appears. However, the liquid column trajectories normalized by the effective diameter and the effective momentum ratio have a similar tendency irrespective of cavitation and hydraulic flip.

초 록

본 연구에서는 캐비테이션과 수력튀김과 같은 유동 현상이 수직 분사된 액체 제트의 분열에 미치는 영향을 살펴보았다. 오리피스 지름, 오리피스의 길이대 지름비, 오리피스 입구의 형상 그리고 배출 압력을 변화시켜가며 내부 유동 변화를 살펴보고 수직분사시 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 있는 경우 중 길이대 지름비가 작은 오리피스에선 캐비테이션 성장에 의한 수력튀김(hydraulic flip)현상도 관찰할 수 있었다. 수직분사시 캐비테이션이 성장할수록 그리고 수력튀김 현상이 나타날 때 액주의 분열거리는 상당히 감소한다는 것을 알 수 있었다. 하지만 곡률이 있는 경우와 없는 경우 모두 유량 계수를 고려한 유효지름과 유효 모멘텀 플릭스 비에 대해 거의 같은 궤적 형상을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

Key Words : Transverse injection(수직분사), Cavitation(캐비테이션), Hydraulic flip(수력튀김), Liquid Column Breakup length(액주분열길이), Liquid column trajectory(액주궤적)

◇ 2002년 11월 24일 접수 ~ 2002년 12월 8일 심사완료

* 서울대학교 기계항공공학부

1. 서 론

횡방향의 공기유동에 수직으로 분사하는 액체 제트의 분무는 제트 엔진의 후연소기, 램제트, 스크램제트 등의 연소기에 이용되고 있어 오래 전부터 중요한 연구 대상이 되어왔다. 이들 연소기의 연소 효율은 분사된 액체 제트의 미립화 특성에 지대한 영향을 받게 되므로 실험뿐 만 아니라 이론적으로도 상당한 연구가 진행되어 왔다.[1-11]

횡방향 고속 기류에 수직으로 분사하는 액체 연료의 분무 과정은 유입되는 공기와의 상호작용을 통하여 이뤄지며 이후 공기와의 혼합과정을 거쳐 연소지점으로 유입이 된다. 액체 연료의 분사는 분사 후 액주의 분열 및 미립화 과정과 혼합과정을 거치므로 혼합과정이 주가 되는 기체 연료의 분사 연구에 비해 그 현상을 이해하기 어렵고 실험적인 연구 접근 방법에 많은 제약이 따른다. 일반적으로 분사된 제트의 분무 형상은 Fig. 1에서 보는 것처럼 액주(liquid column), 액사(ligament), 액적(droplet)의 세 영역으로 정의된다.[1] 분사된 액체 제트는 어느 거리만큼 액주로 존재하게 되며 이때 공기역학적 힘에 의해 액주의 방향은 기류의 방향으로 전환하게 된다. 이 때 작용하는 공기 역학적 힘은 액주 표면에 액주파(column waves)를 형성하고 이것이 증폭이 되면서 액주는 어느 거리에서 덩어리진 액사로 분열을 일으키게 된다.[2-5] 분열된 액사는 잠시 존재하다가 유동방향으로 좀 더 흐르면서 이차분열을 일으키게 되고 결국 작은 액적으로 깨진다. 한편 Wu 등[3]은 액주파의 형성에 의한 액주의 분열(column breakup)과는 별도로 액주 주변에서 액적이 직접 떨어져 형성되는 것을 관찰하였고 이를 표면 분열(surface breakup)으로 정의하였다. 이 두 가지 미립화 과정 중 전자가 지배적인 과정이며 후자는 공기 유동과 분사된 제트의 모멘텀 비(momentum ratio, q)가 클수록 잘 일어난다. 분열이전의 액주의 궤적은 분열 이후 액적의 형성 위치를 결정하는데 크게 영향을 주기 때문에 액체 연료가

공기와 얼마나 잘 혼합되었는가를 나타내는 중요한 파라미터가 된다. 따라서 액주의 분열 현상을 배제한 채 액적이 모두 분열한 이후의 단순한 궤적만을 연구하는 것은 실제적인 현상을 정확하게 정립하는데 한계가 있을 수밖에 없다. 또한 수직분사에 대한 수치적 접근으로는 액주의 분열 과정을 표현하기 어려우므로 액적으로 미립화 이전 액주의 분열과정 및 궤적에 대한 모델링과 그에 대한 실험적인 해석은 수직 연료분사를 이해하는데 있어 필수적이다.

액주의 궤적과 분열 거리에 대한 실험적 연구는 이미 적당한 모델링을 통한 이론적 해석과 함께 많은 사람들에 의해 수행되었다.[1-4,6,7,9] Schetz와 Padhye[2]는 최대 침투 높이를 제트 분사시의 운동량 플럭스가 공기 유동의 방향으로 전환되는데 필요한 거리로 가정하고 침투 깊이 액체연료와 공기의 모멘텀 플럭스 비 q 의 함수로 표현하였다. Wu 등[3]은 액주의 수평방향 가속력이 액주 전면에 작용하는 공기역학적 힘과 같다는 가정 하에 분열하기 이전 액주의 궤적을 분석하였으며 구형 액적의 이차 분열에 대한 시간 척도(time scale)를 이용하여 수평방향과 수직 방향의 분열길이를 예측하고 여러 가지 경우에서 실험적 결과로 타당성을 검증하였다. Nguyen과 Karagozian[4]은 유동공기와 액주의 상호작용을 시뮬레이션하는 수치 모델링을 통해 연소조건과 비 반응조건에서의 궤적을 예측하였다. 분사된 제트는 액주에 부딪치는 공기의 압력과 서로간의 경계면에서 작용하는 점성력의 복합적인 작용으로 액주의 단면에 두개의 볼텍스 쌍이 형성되어 모양이 점차 콩팥 형상(Kidney-shape)으로 변하게 되며 이 모양은 후반부의 액적 분포에도 영향을 주게 된다.[10]

앞에서 언급했다시피 액적 형성의 주요한 메커니즘은 액주파(column wave)의 성장이다. Schetz 등[5]은 액주파를 공기 역학적 힘에 의한 가속파(acceleration wave)로서 액주 분열의 주된 요인으로 보았으며 Ingebo[11]는 액주파를 모세관 현상과 가속파로 보고 액주파의 고점으로부터 액사가 형성되는 과정을 미립화로 보았다.

액체 연료와 횡방향 유동 사이의 공기역학적 힘 외에 수직 분사된 액체 제트의 분열특성에 영향을 미치는 인자로 생각해 볼 수 있는 요소로는 액체 연료의 물성치에 따른 표면 장력과 점성력 등이나 인젝터 형상에 의한 내부 교란에 따른 액체 제트 자체의 난류강도이다. 지금까지의 연구 결과를 보면 표면장력과 점성력 등의 액체 물성치들이 액주의 궤적에 미치는 영향은 그리 크지 않다는 결론이 있는가 하면[2,6,12] 최근엔 점성이 큰 액체 연료의 액주 표면에서 경계층이 더 두껍게 형성이 되어 점성이 작은 액체 연료의 액주 표면에서보다 더 큰 비율의 힘을 받아 액주가 유동방향으로 더욱 잘 꺾여 침투 깊이가 줄어든다는 결론도 제시되었다[3].

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 내부유동 현상이 수직 분사된 액체 제트에서 액주의 분열위치 및 궤적과 같은 분열 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

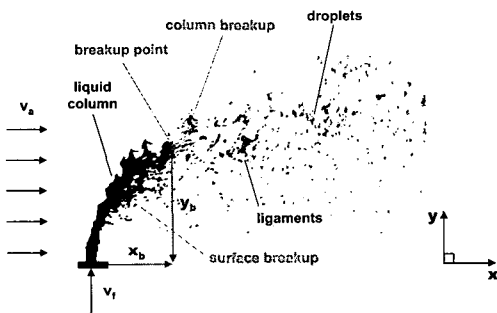


Fig. 1 Jet structure of transverse injection

2. 실험장치 및 방법

2.1 인젝터(Injector)

Fig. 2는 실험에 사용한 인젝터이며 각 인젝터 내부의 세부적인 오리피스 형상은 Fig. 3에 나타내었다. 인젝터는 내부 오리피스 유동을 관찰하기 위하여 아크릴을 소재로 제작하였으며

투명도를 높이는 표면 처리를 하였다. 인젝터 내부는 오리피스와 챔버로 이루어졌다. 오리피스는 지름이 $d=0.5\text{ mm}$, 1.0 mm 두 가지 경우로 하여 지름의 차이에 의한 영향을 알아보고자 하였으며 챔버의 지름은 12 cm 로 각각 $D/d=12$, 24 이다. 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[13]. 곡률이 없는 경우에는 길이대 지름비에도 차이를 두었는데 길이대 지름비를 각각 $L/d=5$, 20 으로 하였다.

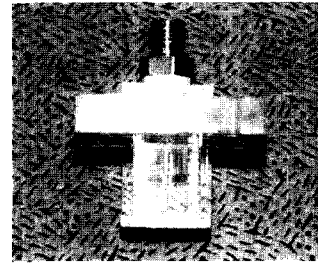


Fig. 2 Injector

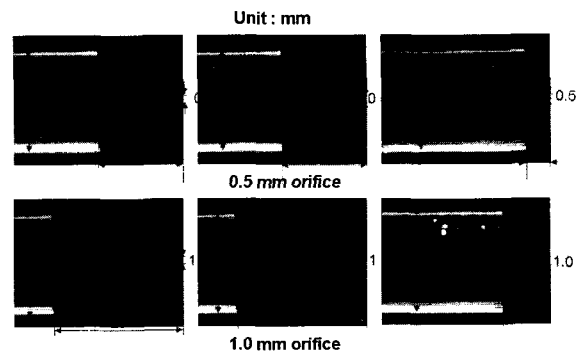


Fig. 3 Details of orifice and chamber in injectors

2.2 시험부(Test Section)

Fig. 4는 시험부의 전체적인 모습이다. 시험부

는 내부 유효 체적이 50 mm × 50 mm × 330 mm인 사각형 덕트로 되어 있으며 130 mm 지점에 인젝터를 넣을 수 있도록 설계되었다. 전면과 후면은 유리로 된 가시화 창이 있으며 제트의 분무를 위, 아래에서도 볼 수 있도록 상, 하부는 아크릴로 하였다. 시험부 앞쪽엔 동일한 단면의 사각형 덕트가 있어 시험부로 들어오는 유동의 일관성을 유지하려 하였다.

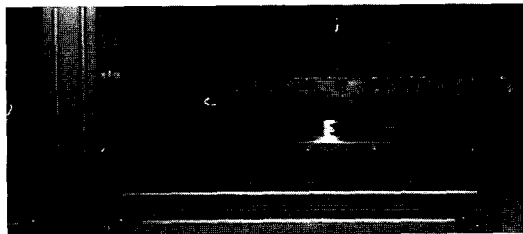


Fig. 4 Test section

2.3 실험방법 및 조건

실험은 세 단계로 수행이 되었다. 우선 카메라 테이션에 의한 유량 변화의 경향을 알아보고 수직분사시 제트의 모멘텀 플럭스 비를 구하기 위하여 각 인젝터의 유량 측정 시험을 수행하였다. 모든 인젝터에 대해서 동일하게 ΔP를 0.5 bar씩 6 bar까지 변화시켜가며 측정하였다. 다음으로 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. ΔP를 1 bar씩 6 bar 까지 변화시켰으며 순간 이미지를 얻기 위하여 스트로보를 10 Hz로 작동시키고 그에 맞게 카메라의 노출시간을 1/10초로 하였다. 마지막으로 각 인젝터 별로 압력을 변화시켜가며 그에 따른 수직 분사 제트 이미지를 획득하고 이를 분석하여 제트의 궤적과 분열 길이에 대한 결과를 얻었다. 압력은 1 bar씩 최대 6 bar까지 변화시켰으며 각 압력에 대해서 30장의 이미지씩 대략 총 900장의 이미지를 획득하였다. 횡방향 유동공기는 60 m/s로 고정하였으며 시험부의 균일한 속도분포는 미리 PIV를 이용하여 확인하였다. 보다 구체적인 실험

조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental condition

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)
ΔP(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 × 50 mm × 330 mm					
Blower	20 hp					
Camera	Canon C30 (2160 × 1440)					
Spark Source	Digital Stroboscope(exposure time < 10 ns)					

3. 실험 결과 및 분석

3.1 유량측정

Fig. 5는 0.5 bar씩 분사압력을 변화시켜가며 각 인젝터의 유량을 측정하고 그 결과를 이용하여 유량 계수 값(C_d)을 구해 보았다. 대체로 곡률이 없는 경우보다 곡률이 있는 경우가 입구 손실이 적어 유량 계수 값이 더 크게 나타났다. 주어진 압력 구간에서 오리피스 지름 크기에 따른 유량 차이를 보면 곡률이 있는 인젝터와 곡률이 없는 L/d가 20인 인젝터의 경우 작은 압력에선 1.0 mm의 유량 계수가 크게 나타났으나 결국 높은 압력에서 0.5 mm의 유량 계수가 더 큰 결과로 나타났다. 반면 곡률이 없는 L/d가 5인 인젝터의 경우 모든 압력구간에서 0.5 mm의 유량계수 값이 크게 나타났다. 어느 인젝터에서나 초기에는 압력이 증가할수록 유량계수가 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/d가 20인 경우 0.5 mm에서는 4 bar 이후로 1.0 mm에서는 2.5 bar 이후로 서서히 감소하는데 비해 L/d가 5인 경우 0.5 mm와 1.0 mm 모두 1.5 bar 이후로 서서히 감소하다가 3 bar에서

갑자기 떨어지며 그 이후로 거의 일정한 유량계 수 값을 보여 준다. 일반적으로 캐비테이션이 발생하여 성장이 이루어지면 유량 계수는 특정한 비율로 감소한다. 캐비테이션의 성장이 충분히 이루어져 수력튀김이 발생하게 되면 유량계수는 급격히 떨어지는 현상을 보이며 이후로는 일정한 값을 보이게 된다.[14, 15] 즉 L/d 가 20인 오리피스에서는 캐비테이션의 성장이 이루어지고 있으며 L/d 가 5인 오리피스에선 캐비테이션이 수력튀김으로까지 발달되었다. 배압과 캐비테이션 영역의 압력 균형이 깨질 때 수력튀김이 발생하게 되므로 오리피스 길이가 길수록 수력튀김이 일어나기는 어렵다. 유량 측정의 결과는 캐비테이션에 대한 적절한 보정을 통하여 제트의 유속을 구하고 이를 이용하여 일정한 공기 속도(60 m/s)에 대한 수직분사 시 모멘텀 플럭스 비를 구하였다.

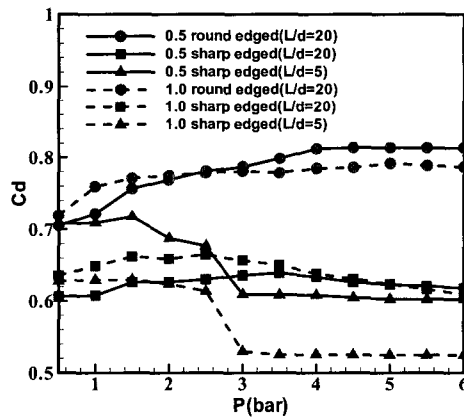


Fig. 5 Discharge coefficients as a function of injection pressure

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. 6과 7은 각각 0.5 mm와 1.0 mm 오리피스에서의 내부유동과 압력에 따른 출구에서의 제트 유동을 나타낸 그림이다. 곡률이 있는 오리피스에서는 어떠한 ΔP 에서도 내부유동에 캐비테이션이 발생한 것을 볼 수

없었으며 상대적으로 다른 출구 제트에 대해 비교적 매끄러운 편이었다.

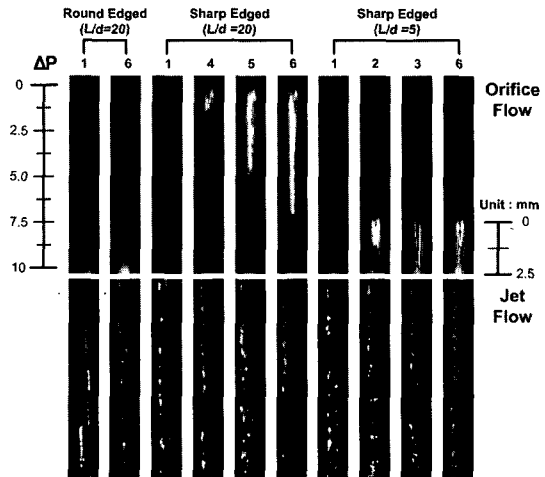


Fig. 6 Internal flows and out jets of 0.5 mm orifices

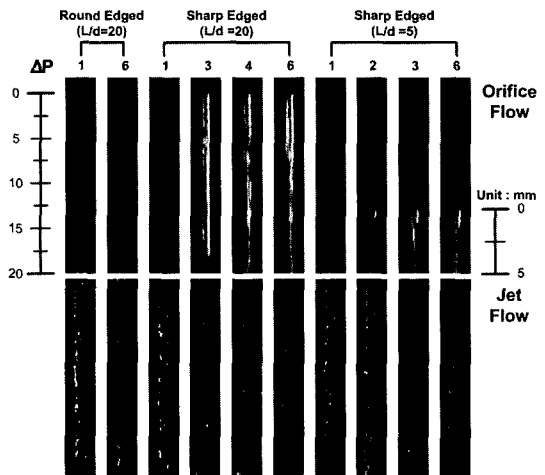


Fig. 7 Internal flows and out jets of 1.0 mm orifices

먼저 Fig. 6의 0.5 mm 오리피스 유동을 보게 되면 곡률이 없는 L/d 가 20인 오리피스에서는 ΔP 가 4 bar에서부터 캐비테이션 영역이 조금 보이기 시작하였으며 압력차가 커질수록 조금씩 성장하는 것을 볼 수 있었다. 또한 주어진 압력 범위 내에서 캐비테이션은 완전히 성장하지 못했다. L/d 가 5일 경우에는 더 낮은 압력인 2 bar 부터 유입구에서 캐비테이션이 관찰되었고 3bar 이후에서는 바로 수력튀김으로 발전하여 내부

벽면과의 분리가 이루어졌다. 캐비테이션으로 인한 제트의 변화는 뚜렷하진 않지만 몇 가지를 확인할 수 있었다. L/d 가 20인 경우 캐비테이션이 발생한 이후에는 곡률이 있는 경우나 그 이전의 압력과는 달리 제트가 불안정해져 약간의 굴곡진 흔들림이 보였다. L/d 가 5인 경우에도 캐비테이션이 발생하면서 제트에 굴곡진 흔들림이 생기기 시작했으나 수력튀김이 일어나면서부터는 출구 이후 단면적이 감소하며 불안정한 흔들림은 나타나지 않았다. 수력튀김으로 발달된 후에는 압력이 증가하여도 흔들림은 여전히 발견할 수 없었다.

Fig. 7의 1.0 mm 오리피스 유동을 보게 되면 0.5 mm의 그것과는 조금은 다른 경향을 관찰할 수 있었다. L/d 가 20인 경우 캐비테이션이 좀더 일찍 3 bar부터 그것도 상당히 성장한 것을 볼 수 있었고 그 이후에는 바로 오리피스 전체가 캐비테이션 기포로 가득하였다. L/d 가 5인 경우는 0.5 mm와 마찬가지로의 경향을 보이며 수력튀김이 발생하였다. 출구 제트에서는 L/d 가 20인 경우에서 캐비테이션으로 인한 변화가 0.5 mm에 비해 뚜렷이 나타났다. 캐비테이션이 오리피스 끝단 가까이까지 진행되어 제트는 약간의 흔들림과 표면이 부스스해지면서 미립화가 촉진되고 완전히 성장한 이후에는 여기에 제트의 심한 굴곡진 흔들림까지 보이게 된다. 이것은 캐비테이션이 완전히 성장한 후 오리피스 끝단에서 압력 불균형으로 일부 공기가 침투되면서 일어나는 현상으로 파악된다. L/d 가 5인 경우에는 0.5 mm의 경우와 유사하게 캐비테이션이 발생하면서 약간의 굴곡진 흔들림이 발생하였다가 수력튀김이 일어난 이후에는 그러한 흔들림은 보이지 않게 되며 L/d 가 20인 경우와 달리 부스스한 제트형상은 나타나지 않았다.

압력이 증가할수록 제트는 난류상태가 되어 투명도가 감소하였고 이것은 캐비테이션의 발생 여부와 관계없이 모든 오리피스에서 동일하였다. 또 L/d 가 20일 경우 1.0mm 오리피스에 캐비테이션이 0.5 mm 오리피스보다 일찍 발생하지만 L/d 가 5인 경우에는 0.5 mm에서 1.0 mm보

다 일찍 발생하여 캐비테이션 발생은 0.5 mm 오리피스가 1.0 mm 오리피스의 경우보다 L/d 에 대한 영향을 더 받는 것으로 짐작된다. 한편 수력튀김이 일어나는 경우에서 제트는 오리피스보다 작은 단면적을 보이는데 압력이 증가하면 제트는 점차 확산되는 경향을 보인다.

제트의 흔들림은 캐비테이션 발생시 나는 특정한 소음과 관련이 있을 것으로 생각된다. 캐비테이션이 발생하면 특정한 주파수의 진동을 유발하며 이 진동은 소음을 내며 제트의 흔들림을 유발한다. 소음의 정도는 진동의 정도와 비례하여 캐비테이션이 성장함에 따라 소음은 더욱 커졌다. 하지만 수력튀김이 일어날 경우에는 상대적으로 소음이 적었다. 실제 Tamaki 등[16]은 인젝터에서 발생하는 진동을 측정하여 캐비테이션이 성장함에 따라 진동의 세기가 커짐을 밝혔다.

3.3 수직분사(Transverse injection)

3.3.1 액주의 분열길이

액주의 분열길이는 액적이 형성되기 시작하는 위치로서의 의미뿐만 아니라, 수치해석에 있어서의 유체와 입자 해석의 경계가 되기 때문에 중요한 분무 특성 변수로 인식되고 있다. 액주의 분열길이에 관해 Wu 등[3]은 몇 가지 가정과 이론 방정식을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$x_b/d = 8.06 \tag{1}$$

$$y_b/d = 3.44\sqrt{q} \tag{2}$$

이를 검증하기 위해 여러 공기 속도에 대해 분사 속도를 변화시켜가며 물성치가 다른 여러 액체를 수직분사하고 각각의 x 방향 및 y 방향 분열길이를 구하여 이 식의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서는 이를 비교 기준으로 삼아 캐비테이션에 의한 분열길이의 감소를 알아보기 위해 모든 인젝터의 x 방향 및 y 방향 분열길이를 구하고 이를 각각 fig. 8, 9에 나타내었다. 곡률이 있는 경우에는 주어진 압력 범위 내에서 이 식에 크게 벗어나지 않는 결과를 볼 수 있었

다. 하지만 곡률이 없는 경우 캐비테이션이 아직 일어나지 않은 구간에서는 곡률이 있는 경우와 유사하게 나타났으나 캐비테이션이 일어나면 서부터는 감소하는 결과를 보이기 시작하였으며 그 감소하는 경향은 오리피스 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 일어난 이후에도 더욱 감소하게 된다. 그러나 Fig. 6과 Fig. 7의 오리피스 내부 유동과 출구 제트의 특징으로 보면 두 경우에서 감소 요인은 서로 다를 것으로 판단된다.

Fig. 10에서는 이 같은 캐비테이션과 수력튀김의 분열길이의 감소 원인의 차이가 무엇인지를 가능하게 해준다. (a)는 캐비테이션이 발생하지 않은 제트의 분사 사진, (b)는 오리피스 내에 캐비테이션이 완전히 성장한 제트의 분사 사진, (b)는 수력튀김이 일어난 이후의 제트의 분사 사진이다. 분열길이는 (a)에서 최대를 보이고 있다. (b)는 액주가 상당히 부스스하고 심한 굴곡이 보이는 반면 (a)와 (c)는 액주표면과 형상이 비교적 매끄럽게 보인다. 또한 (b)는 (c)보다 상대적으로 액주표면분열이 활발하게 일어나고 있음을 볼 수 있다. 액주표면분열이 캐비테이션이 없는 경우 미립화가 활발하게 일어나는 높은 압력에서 잘 나타나는 것을 생각해 볼 때 (b)에서 더 활발하게 미립화가 이뤄지고 있다고 말할 수 있다. 이상의 결과로 캐비테이션의 경우 그것이 성장하여 발생하는 흔들림에 의한 제트의 교란이 분열과정을 빠르게 시작시키고 촉진시켜 액주의 분열이 빠르게 진행된다고 여겨지는 반면 수력튀김은 강한 교란보다는 제트 단면적 감소에 의한 결과가 분열길이 감소효과를 나타낸 주된 요인으로 생각되며 수력튀김 현상 이후 발생하는 제트 분사각의 확산 또한 그 요인으로 생

각된다.

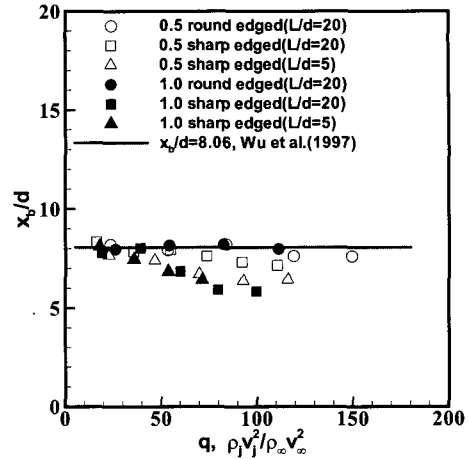


Fig. 8 X-direction breakup length

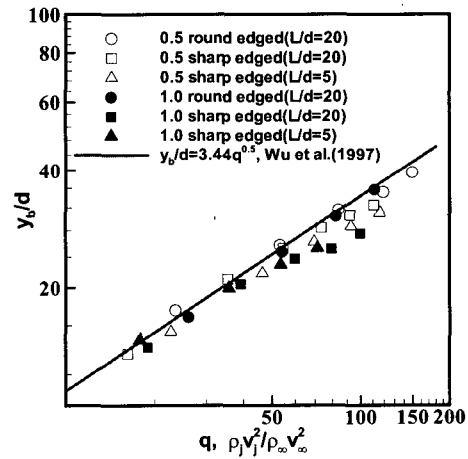


Fig. 9 Y-direction breakup length

3.3.2 액주의 분무체적

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

$$q = \frac{\rho_j v_j^2}{\rho_a v_a^2} \tag{3}$$

Chen 등[1]은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$y/d = 9.91q^{0.44} [1 - \exp(-x/d/13.1)] \times [1 + 1.67 \exp(-x/d/4.77)] \times [1 + 1.06 \exp(-x/d/0.86)] \quad (4)$$

Wutel 등[6]은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$y/d = 1.19q^{0.45}(x/d)^{0.45} \quad (5)$$

Geery 등[7]은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$y/d = 2.1\sqrt{q}(x/d)^{0.27} \quad (6)$$

Wu 등[3]은 간단한 이론 방정식과 실험을 통하여 분열되기 이전의 액주의 궤적에 대해 다음과 같은 근사식을 제안하고 그 유효성을 검증하였다.

$$y/d = 1.37\sqrt{(x/d)q} \quad (7)$$

Wu 등[17]은 액주에서 액적까지 분무 영역 전체에 대한 액주의 침투 깊이에 대해서 다음과 같은 근사식을 제안하였다.

$$y/d = 4.3q^{0.33}(x/d)^{0.33} \quad (8)$$

이러한 근사식들의 차이는 실험 유동 조건과 근사를 위해 궤적의 어느 부분까지를 보았는가의 실험 조건 차이에 그 원인이 있다고 판단된다. 유동이 천음속 이상에서는 아음속 유동에 비해 상대적으로 액주에 미치는 공기 저항이 크게 작용하여 궤적이 좀더 낮아지며[2] 분열과정 중 궤적을 만드는 액주의 공기에 의한 변형과 액주에서 분열된 액적은 상대적으로 횡방향 유동에 대해 그 움직임에 차이가 있을 것으로 생각되기 때문이다. 식 (3)-(8) 중에서 식 (5)와 식 (7)은 상당한 유사함을 보이고 있다. 본 연구에서는 Wu 등[3]과 같이 액주의 궤적에 초점을 맞추고 있으므로 분열길이에서와 마찬가지로 식 (7)을 본 연구에서 얻은 궤적곡선과 비교해 보도록 하겠다.

Fig. 11, 12, 13은 각각 오리피스 형상별 0.5 mm, 1.0 mm 오리피스의 분사 압력에 따른 액주의 분무궤적을 액주의 지름으로 정규화하여 나타낸 그림이다. power fitting을 하여 그 궤적곡선을 나타내었으며 분열위치 이후에는 궤적



(a) 1.0 round edged orifice at 3 bar($q=82.49$)



(b) 1.0 sharp edged orifice($L/d=20$) at 4 bar($q=79.73$)



(c) 1.0 sharp edged orifice($L/d=5$) at 4 bar($q=71.43$)

Fig. 10 The differences of breakup process by cavitation phenomena

데이터가 심하게 흩어지게 되어 분열길이 근처의 유효한 데이터만을 근사화하였다. 이전의 연구 결과를 통해 알려졌다시피 압력이 증가하면 q 가 증가하게 되어 액주 곡선의 상승 높이가 증가하였다. 또 오리피스 지름이 클수록 궤적 높이가 증가하였는데 식 (7)을 통해서 알 수 있듯이 오리피스 지름으로 정규화된 궤적 곡선은 비슷한 값의 q 에 대해 유사한 곡선을 보였다. 대체로 유입구 손실이 적어 유량계수가 큰 곡률이 있는 경우가 다른 곡률이 없는 경우에 비해 동일한 압력에 대해서 더 높은 침투 깊이를 나타냈다.

Fig. 14, 15, 16은 서로 다른 지름을 갖는 오리피스 형상이 동일한 궤적값들을 정규화하여 근사식과 어떤 차이를 보이는지 확인해 본 결과이다. 모든 오리피스형상에서 궤적값은 식 (7)에 근접해 있는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 캐비테이션이나 수력튀김 등의 유동 특성이 액주의 평균적 궤적에 큰 영향을 미치지 못하였다는 것을 의미한다. 그 현상을 설명해 보면 다음과 같다. 액주가 캐비테이션이나 수력튀김 등에 의해 어떠한 변화를 받더라도 오리피스를 빠져나

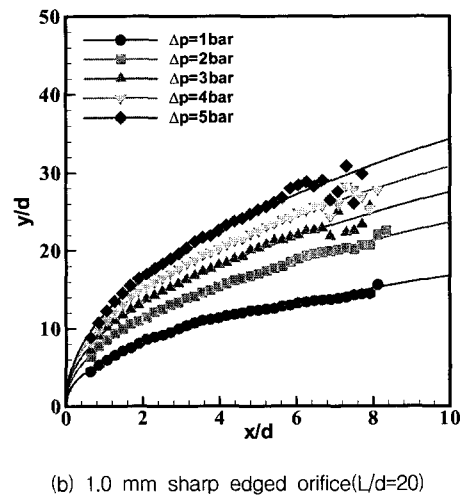
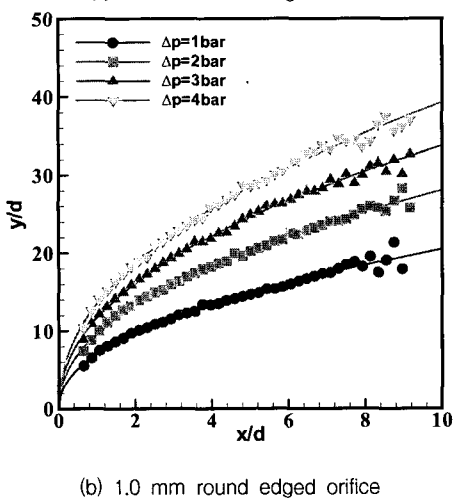
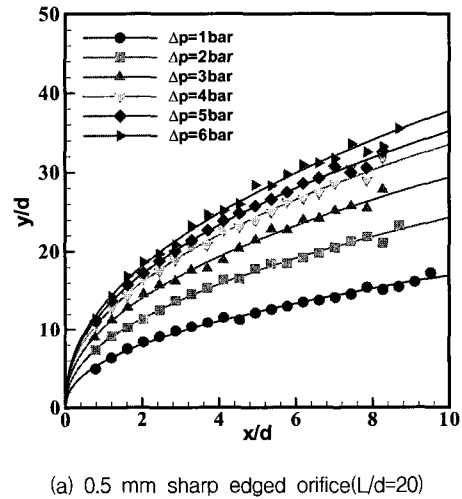
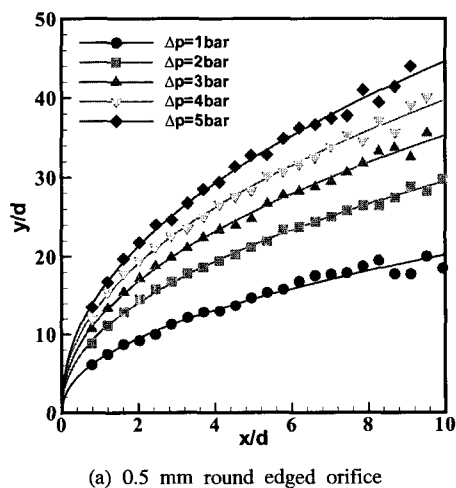
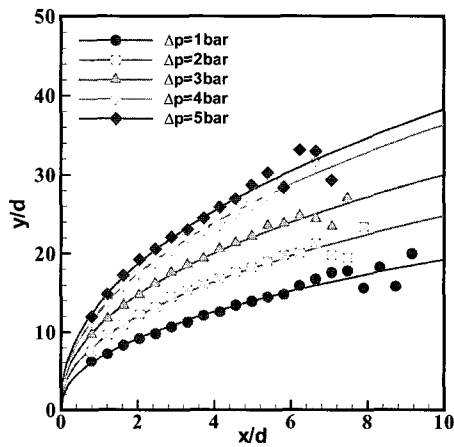


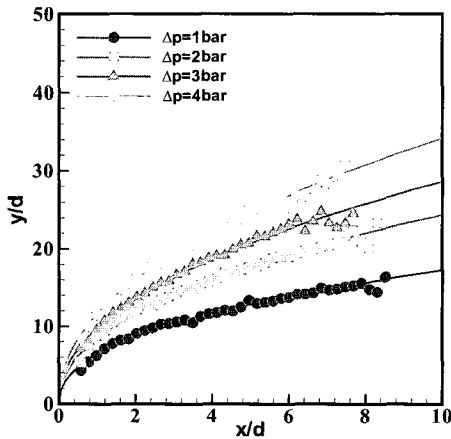
Fig. 11 Normalized trajectories of round edged orifices(L/d=20)

Fig. 12 Normalized trajectories of sharp edged orifices(L/d=20)

은 액주는 수직 모멘텀을 보존하고 있다. 따라서 액주는 횡방향 유동에 의해 분열이 일어나기 전까지는 동일하게 일정한 높이까지 상승하게 된다. 하지만 액주 형상 변화에 의한 공기 저항은 달라질 수 있는데 이 차이는 그리 크지 않아 보이며 결국 일반적인 궤적곡선에서 크게 벗어나지 않는 결과를 보여준 것이다.



(a) 0.5 mm sharp edged orifice(L/d=5)



(b) 1.0 mm sharp edged orifice(L/d=5)

Fig. 13 Normalized trajectories of sharp edged orifices(L/d=5)

이상의 결과를 토대로 Fig. 17에는 모든 오리피스에 대해 궤적들을 근사시켜 전체 궤적 곡선의 근사식을 도출하고 이를 식 (7)과 비교해 보고자 하였다. 전체 궤적 또한 식 (7)에 잘 수렴 하였으며 전체 데이터를 power fitting 하여 그 결과로 식 (7)과 거의 일치하는 본 연구에서의 근사식을 구할 수 있었다. 두 식의 상수값 차이는 실험장치에 따른 경계층 조건의 차이에 기인한다고 생각된다.

$$y/dq = 1.302(x/dq)^{0.502} \quad (9)$$

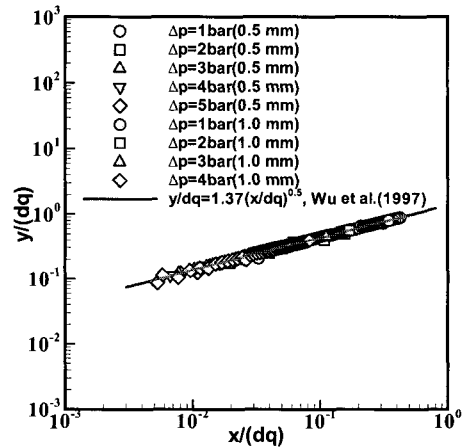


Fig. 14 Correlated trajectories of round edged orifices(L/d=20)

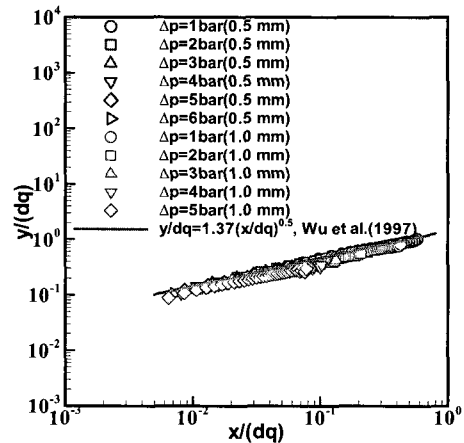


Fig. 15 Correlated trajectories of sharp edged orifices(L/d=20)

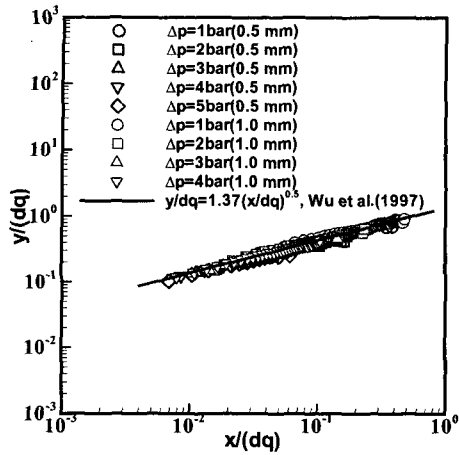


Fig. 16 correlated trajectories of sharp edged orifices ($L/d=5$)

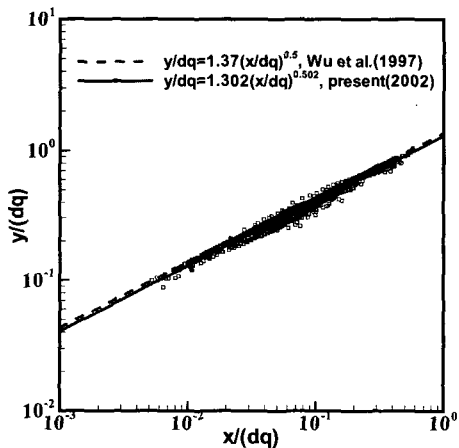


Fig. 17 All trajectories correlation

4. 결론

본 연구에서는 인젝터 내부 형상차이에 의한 오리피스 내의 캐비테이션의 성장과 수력튀김으로의 발전이 수직분사에서 액주 분열에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 캐비테이션이 발생할 때의 유동 특징을 알아보고 수직분사 시의 액주의 분열길이 및 액주의 궤적 등의 특징적 인자들을 구하여 액주 분열에서 캐비테이션의 영향에 대해 고찰해 보았다. 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. L/d 에 따라서 발생시기와 그 성장 차이가 달라지며 L/d 가 작은 경우에는 수력튀김(Hydraulic flip)현상으로 발전하기도 한다.

2. 캐비테이션은 출구를 빠져나온 제트를 불안정하게 하는 요인이 된다. 오리피스 지름 크기에 따른 캐비테이션의 성장 정도 차이가 제트의 불안정성 및 난류 강도 차이의 큰 요인이 되는 것으로 보이며 이의 결과로 인젝터에서 소음 및 진동 등의 부수적인 현상이 관찰된다.

3. 오리피스 내부 벽면과 유체의 분리 현상인 수력튀김은 빠져 나온 제트에서 그 이전 단계의 캐비테이션과 다른 모습을 보인다. 교란에 의한 제트의 굴곡진 흔들림이나 부스스한 제트 형상을 관찰할 수 없으며 초기에는 오리피스보다 작은 단면적을 보이다가 압력이 증가하면서 점차 확산되는 경향을 보인다.

4. 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 감소 및 그 이후 압력 증가에 따른 제트 분사각의 확산이 그 요인으로 생각된다.

5. 캐비테이션과 수력튀김현상 등은 제트의 궤적에는 큰 영향을 주지 않았는데 이는 이러한 내부 유동 변화가 있더라도 제트의 수직 분사 모멘텀은 보존이 되기 때문이다.

6. 모든 오리피스에 대해 궤적들을 근사시켜 전체 궤적 곡선의 근사식을 도출하고 이를 기존의

연구 결과와 비교해 보았다. 전체 궤적은 이전 결과에 잘 수렴하였으며 그 결과로 다음과 같은 궤적 근사식을 구할 수 있었다.

$$y/dq = 1.302(x/dq)^{0.502}$$

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(M1-0104-00-0058) 및 국방과학연구소 기초연구사업(ADD-00-4-3)의 지원을 받았습니다.

참고 문헌

- [1] Chen, T. H., Smith, C. R., Schommer, D. G., and Nejad, A. S., "Multi-Zone Behavior of Transverse Liquid Jet in High-Speed Flow," AIAA Paper 93-0453, Jan. 1993.
- [2] Schetz, J. A., and Padhye, A., "Penetration and Breakup of Liquids in Subsonic Airstreams," AIAA Journal, Vol. 15, No. 10, pp. 1385-1390, 1977.
- [3] 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.
- [4] Nguyen, T. T., and Karagozian, A. R. "Liquid Fuel Jet in Subsonic Crossflow," Journal of Propulsion and Power, Vol. 8, No. 1, pp. 21-29, 1992.
- [5] 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, pp. 774-778, 1980.
- [6] Wotel, G. J., Gallagher, K. E., Caron, S. D., Rosfjord, T. J., Hautman, D. J., and Spadaccini, L. J., "High Speed Turboramjet Combustor Technology Program," Wright Lab., TR-91-2043, WrightPatterson AFB, OH, 1991.
- [7] Geery, E. L. and Margetts, M. J., "Penetration of a high Velocity Gas Stream by a Water Jet," Journal of Spacecraft, Vol. 6, No. 1, pp. 79-81, 1969.
- [8] Inamura, T. and Nagai, N., "Spray Characteristics of Liquid Jet Traversing Subsonic Airstream," Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 2, pp. 250-256, 1997.
- [9] Inamura, T., "Trajectory of a Liquid Jet Traversing Subsonic Airstreams," Journal of Propulsion and Power, Vol. 16, No. 1, pp. 155-157, 2000.
- [10] Thomas, R. H. and Schetz, J. A., "Distribution Across the Plume of Transverse Liquid and Slurry Jets in Supersonic Airflow," AIAA Journal, Vol. 23, No. 12, pp. 1892-1901.
- [11] Ingebo, R. D., "Aerodynamic Effects of Combustor Inlet-Air Pressure on Fuel Jet Atomization," AIAA Paper 84-1320, June 1984.
- [12] Nejad, A. S. and Schetz, J. A., "Effects of Properties and Locations in the Plume on Droplet Diameter for Injection in a Supersonic Stream," AIAA Journal, Vol. 21, No. 7, pp. 956-961, 1983.
- [13] Vennard, J., Elementary Fluid Mechanics, Wiley, New York, 3rd ed., pp. 216-219.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] N. Tamaki, M. Shimizu, K. Nishida and H. Hiroyasu, "Effect of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet," Atomization and Sprays, Vol. 8, pp. 179-197, 1998.
- [17] Wu, P. -K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Nejad, A. S., "Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 2, pp. 173-182, 1998.