

공급 질량비 변화에 따른 2유체 노즐의 액주분열특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Break-up Characteristics of Twin-Fluid Nozzle
According to the Variations of Feeding Mass-ratio

강 신 재*, 오 제 하**, 노 병 준***
S. J. Kang, J. H. Oh, B. J. Rho

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the break-up characteristics by taking advantage of a two-phase coaxial nozzle. Air and water are utilized as working fluids and the mass ratio air/water has been controlled to characterize the atomization, diffusion and development of mixing process. By way of a photographic technique, conventional developing structures and diffusion angles have been analyzed systematically with variations of mass ratios. The turbulent flow components of the atomized particles were measured by a two channel LDV system and the data were treated by an on-lined measurement equipment. According to the photographic results, the spreading angles decreased because the axial inertia moment was relatively higher than the lateral one with respect to the increase of mass ratio. It is found the jet flow diffuses linearly in a certain limit region while the atomizing characteristics, in terms of the distributions of particle diameters did not show particular differences. It may be expected that these fundamental results can be used as reference data in studying the atomization, breakup and diffusions.

Key words : Spray (분무), Atomization (미립화), Twin-Fluid (이류체), Mass ratio (질량비), LDV (Laser Doppler Velocimeter), SMD (Sauter Mean Diameter), Break-up (분열), Image Processing (영상 처리)

1. 서론

액체 분무는 주로 내연기관, 항공기 제트 기관, 산업용 보일러 등의 연소를 위한 혼합기의 형성, 가열된 노의 냉각 그리고 산업용 분무기 등에 많이 사용되고 있다.

액체 분무란 노즐을 통하여 분사되는 액체를 작은 액적들로 미립화시켜 액체의 표면적을 넓혀줌으로써 분사 액체들과 주위

기체 사이의 열 및 물질 전달을 크게 촉진시키는 역할을 한다. 이로써 미립화에 의한 연소에서 화염의 진행속도는 크게 가속화되어 연소실내의 급속연소를 이룰 수 있으며, 정해진 시간내에 미연소되는 부분을 줄일 수 있게 된다. 또한 이들 미립화의 정도에 따라 연소 생성물 중의 soot와 미연탄화물(HC) 등의 오염물질의 배출량 감소에도 막대한 영향을 미칠 수 있게 된다.

* 전북대학교 우주항공공학과
** 전북대학교 대학원 정밀기계공학과
*** 전북대학교 정밀기계공학과

그러나 이들 미립화를 위한 액체 분무에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으면서도 그에 대한 구체적 이론은 아직 정확히 밝혀져 있지 않고 있으며, 미립화 과정에 대한 세세한 관찰과 분석 역시 크게 부족한 상태다.

액체 분무에 관한 연구는 주로 노즐 구조와 형상 그리고 분사 조건의 변화에 따른 액체 분무의 관통도, 분무의 확산, 입자 분포, 액적의 속도 및 크기 등이며, 이들 특성을 설명하거나 예측하기 위해서는 분사되는 액체가 작은 액적들로 분열되는 미립화 기구와 주위 기체의 유입과 주위 기체의 함력에 의한 확산등 액체의 물리적 특성과 함께 응축, 증발등 열전달 현상에 관한 다양한 이해가 필요하다.

액체의 분열에 크게 영향을 미치는 인자로서는 액체의 점성력, 분사압력, 액체의 표면장력, 주위 기체의 유입과 노즐의 구조에 의한 분류 자체의 난류성 초기 교란 등이며, 분열기구로서는 액주 자체의 관성력과 표면장력의 차에 의한 액주 선단에서의 액주 자체분열과 동축 기류, swirl, 진동 등에 의한 2차 미립화 기구 등을 대표적으로 들 수 있다.

관련 연구 동향으로서 Gomez⁽¹⁾는 고속 액체 분사에서 사진 기법을 이용하여 액주의 불안정성 및 Solenoid Valve의 개폐에 의한 액사(Ligament)의 생성에 대해 연구하였으며, 또한 분사에 의한 확산각을 최대각과 최소각에 의한 평균확산각으로 정의하여 측정하였다. 또한 노즐출구의 기하학적 형태에 따른 분사 액주의 변화 과정을 연구한 바가 있다. S. Zanelli⁽²⁾는 연소 과정은 연료 분무 액적의 크기 및 속도 분포에 의해서 영향을 받는다고 발표하였으며, 특히 고속 조건하에서 사진 기법을 이용하여 분사 특성을 규명하였다. E. Blumcke⁽³⁾ 등은 가스 터빈 엔진의 연소실에서 사용하고 있는 2상 공기 송풍 노즐의 난류 혼합 특성을 LDV를 사용하여 유동 단면에 따라 액적의 난류 특성치들을 측정하여 2상 공기 송풍노즐의 구조적 특성에 대하여 해석

하였다. H. Koshiba⁽⁴⁾ 등은 디젤기관에서 사용되는 고압 분사노즐의 성능 향상을 위한 새로운 형의 노즐 개발 및 저압과 고압 조건하에서 관통도, 액적 속도, 입경 등을 측정하여 노즐 분무 특성을 규명하였다. 또한 강신재⁽⁵⁾는 45° 확산형 동축2상 분무의 난류혼합유동을 액침법에 의해 분무 액적의 평균직경 및 액적의 파동직경 성분을 측정하고, LDV 시스템을 이용하여 액적유동속도의 난류특성치 등에 대해 연구한 바가 있다.

본 연구에서는 노즐을 통한 액주의 분열 과정 이해가 액체 분무의 미립화에서 무엇보다도 중요하다고 생각하여 액체 분사를 위한 단일노즐의 중심에 가느다란 봉을 삽입시킨 환형 노즐에 동축 외주 기류를 부가시켜 주위 기체와의 접촉면적을 가급적 크게 하기 위한 액막형 동축노즐을 제작하여 이들 현상을 규명하도록 하였다. 이들 현상의 순간 포착을 위한 촬영 장비와 이들의 해독과 분열된 액적들의 크기관측을 위한 영상처리장치(Image Processing System), 입자의 속도를 측정하기 위한 레이저 도플러 유속계(LDA), 이들 데이터의 처리와 그래픽을 위해 컴퓨터를 사용하였다.

따라서 본 연구의 목적은 액주의 분열과정을 조건의 변화에 따라 분석하고, 분열된 액적들의 직경을 측정하여 이들의 미립화 성능을 분석하며, 또한 분열된 액적들이 위치와 조건별 액적의 관성에 의한 속도장을 계측함으로써 동축 2상분무에 대한 미립화 특성을 규명하고, 나아가서는 동축 2상 분무 노즐이 적용되는 각종 산업용 기기의 구조 설계 및 고성능 노즐 개발을 위한 효율 개선 등의 실제 응용에 관한 기초 자료로 삼고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 노즐분사장치

노즐 공급장치의 제봉도는 Fig.1과 같이 크게 액체 공급부와 기체 공급부로 나눌 수 있으며, 물과 공기는 각각 별개의 압력원과 미세 유량조절계를 통하여 노즐에 공급된다. 맥동현상을 방지하기 위해 활 공급부에는 고압 가스탱크를 압력원으로 하여 일정유량이 연속적으로 유지되도록 하였으며, 공기 공급부에는 공기 압축기를 압력원으로 하여 공기압 조절탱크와 공기정화기를 설치하여 가능한 균일한 압력 유지와 불순물 침투 방지에 주의를 기울였다.

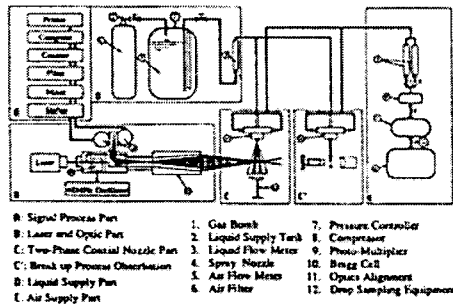


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

물과 공기의 공급압력은 각각 5 kg/cm^2 을 유지하였다. 또한 유량조절의 정확성을 기하기 위하여 액체는 0.005 l/min , 공기는 0.5 l/min 까지 조절이 가능한 미세한 유량계를 각각 사용하였다.

본 논문에서 사용한 액막형 동축 분무 노즐은 Fig.2와 같이 공기와 물의 혼합이 분출 직후에 일어나는 외부 혼합형이며, 분출 방식으로는 외부공기공급형(air-outer type)이다. 그리고 분사되는 액체가 주위 기체와의 접촉 면적을 가급적 크게 갖게 하기 위하여 액체의 유동경로상의 중심에 가는 봉을 삽입시켜 액체가 속이 빈 원통막 형태로 분출하게 하였다. 또한 노즐 출구부의 확산각은 45° 를 주었다.

2.2 측정기기

액적의 직경을 측정하기 위해서 공구 현미경과 8 mm Video Camera, 그리고 영상처리 시스템(Image Processing System)을 사용하였다.

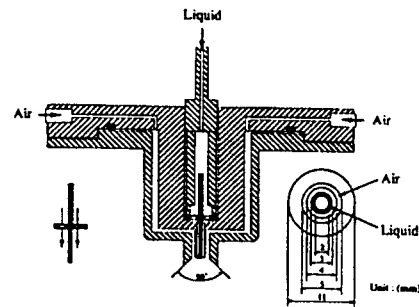


Fig.2 Schematic diagram of coaxial liquid sheet type nozzle

또한 분무의 분열길이를 측정하기 위해 사진기법을 이용하였으며, 장비로서는 카메라(Nikon FM-2, 52mm)와 근접촬영렌즈(Close-up lens, Bellows, Macro lens)등이며, 조명을 위해 암실과 조명(500W, Photo-Reflector-Lamp, 2 EA)을 사용하였다.

동축 2상 노즐의 분무 입자의 속도 측정을 위해서 Fig.1과 같이 노즐 분사 장치와 함께 LDA System을 구성하였다.

분무 유속 측정 장치로는 2채널 LDA system(5W, Ar-ion, DANTEC)을 사용하였으며, 이것은 동력 공급기(Power Supply, model 57D10), 고전압 공급기(High Voltage Supply, model 55L97), LDA신호 계수기(LDA Counter, model 55L96), 평균속도 계산기(Mean Velocity Computer, model 55L94), 주파수 변환기(Frequency Shifter, model 55N12), DATA연결기(Buffer Interface, model 57G20), DATA속도계(Data Rate, model 55L91)등으로써 구성되어 있으며, 여기에 디지털 오실로스코프(Digitizing Oscilloscope, HP model 54201A)와 컴퓨터를 On-Line으로 연결하여 신호를 관찰하고 계산하였다. 측정부를 정확히 이동시키기 위해서 자동 이동장치를 사용하였다.

2.3 측정방법

실험 조건으로써, 분사 공간은 자유대기 상태를 유지하였고, 주위 대기를 온도 22 °C, 습도 55%를 유지하도록 노력하였으며, 분무의 분열과정과 분열길이 및 액사의 관찰을 위해 암실에서 벨로우즈 렌즈를 부착한 카메라를 Fig.1과 같이 노즐로부터 110cm전방에 위치시켜 삼각대에 고정하였다. 또한 Stroboscope를 노즐 후방 22cm에 고정시킨 후 조리개를 개방시키고 순간적인 역단발광을 이용해 액주분열의 순간을 포착하였다. 사용한 필름으로는 트라이 X 판(ASA 400, KODAK)이었다.

분무의 분산정도를 알아보기 위한 일환으로 노즐 끝으로부터 분산되는 상태를 마크로 기법을 이용해 액량과 공기량에 따라 사진 촬영하여 분무 확산각을 측정하였다. 촬영을 위하여서는 암실에서 좌우측 후방 45°위치에서 노즐을 향해 투광시켜 이들의 산란광을 포착하도록 하였다.

액적들의 크기 측정은 각 분무 단면의 중심에서 실리콘 오일을 사용한 액침법으로 입자들을 포집하였으며, 입자의 관찰과 크기 측정을 위해서 영상처리시스템(Image Processing System)을 사용하였다. 슬라이드 글라스의 실리콘오일위에 포집된 액적들은 현미경을 통해 CCD 카메라(8mm, SONY Handycam)로써 영상처리장치(IPS)에 입력되며, 자체 제작한 program을 이용하여 이들 액적의 크기를 자동 판독하도록 하였다. 판독을 위해 한 화소당 명암 정도를 확인하였으며, 선명한 스캔을 위해 필터링을 하였다. 또한 단위 마이크로미터까지 정확한 측정을 위해 현미경의 배율을 조정하였다. 포집 장치로써는 미립화상태에서 액적의 크기가 비교적 큰 것들로 이루어진 분무의 중심위치에서 스프링이 부착된 작은 기계식 알루미늄 액적 포집기를 제작하여 사용하였다. 액침법에 의한 분열 입자의 포집 방법에는 몇 가지 오차 요인이 알려져 있으나 비교적 오차 요인이 적고, 포집

방법이 간편하며, 제작이 용이한 까닭에 많이 이용되고 있다. 본 실험에서는 이들 오차 요인을 가급적 줄이기 위해 실내 온도와 습도, 오일의 점도, 셔터의 두께와 속도 등에 특히 유념하였다. 본 실험에서 채택한 조건과 측정 위치는 액체와 공기 대질량비를 미립화 특성이 나타나는 최소 1.0에서부터 미립화 상태의 자기보존영역이 근사적으로 이루어지는 범위내로 결정하고, 이중 1.0, 1.5, 2.2, 2.8, 3.4를 임의적으로 선택하여 미립화 정도를 측정하였고, 측정 위치는 분사 중심 위치에서 측방향으로 노즐 출구의 근접 위치에서부터 시작하여 분산각이 거시적으로 유지되는 범위내인 100, 200, 300, 400(mm) 까지를 분사방향에 대한 측정 위치로 선택하여 분무 거리에 따른 액적크기와 속도분포를 측정하였다.

입자의 속도 측정을 위한 LDA의 사용 방법은 Counter에 내장된 High-Low pass Filter의 구간을 분류의 특성에 맞추어서 최대 유효율이 나타나도록 하였으며, PM(Photo-Multiplier)에서 포착한 도플러 주파수는 최상의 도플러 신호를 얻기 위하여 임의적으로 편이 시킨 후 컴퓨터 프로그램에서 편이 시킨 만큼의 주파수를 다시 가감하여 평균속도 및 난류 특성치들을 계산하였다. 레이저 빔에 의해 1차적으로 계측된 값은 u방향 순간속도이며, 이를 Program을 이용하여 원하는 여러 난류성 속도함수들을 계산하였다. 그리고 한 채널당 각 지점에서 평균 처리한 샘플수는 2000개였으며, 각 지점에서의 이송은 컴퓨터에 의해 미소거리까지의 자동 이송이 가능한 2채널 자동 이송장치를 사용하였다.

3. 실험결과와 분석 및 고찰

3.1 액주 분열길이의 변화

노즐로부터 분출된 액주는 입위의 위치에서 액적으로 분열되기 시작하는데 이를 액

주의 분열이라 하며, 노즐로부터 분열위치까지의 거리를 분열길이라 부른다. Rayleigh에 의한 액주의 불안정성 곡선은 이들 분열길이의 변화에 따라 미립화까지의 과정을 설명하고 있으며, 이 분열길이는 액체분사의 미립화의 정도를 예측할 수 있는 자료로써 매우 중요하다고 할 수가 있겠다. 또한 Weber는 이 분열길이를 액체의 관성력과 표면장력과의 비로써 정량화시킨 바가 있다.

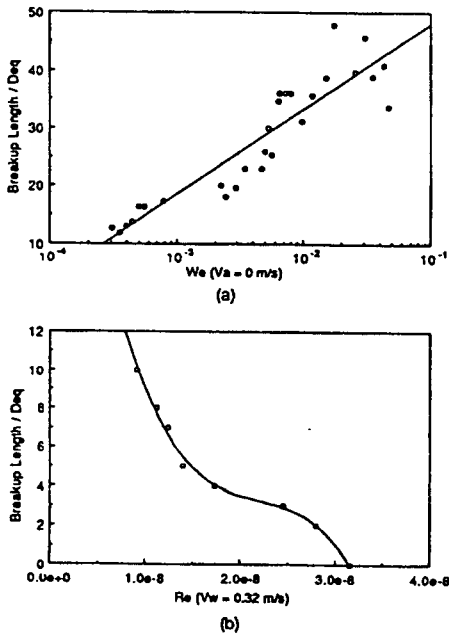


Fig.3 Variation of break up length vs. We and Re number

본 연구에서는 이들의 분열길이를 측정하기 위해 사진 기법을 이용하였으며, 위치의 난동폭을 고려하여 3회 평균처리하였다. 실험결과로서 Fig.3-(a)는 최소 평활류가 형성되는 유량을 공급 유량의 시작점으로 정하고, 외주 기류의 투입이 없이 액량만의 증가에 따라 분열길이의 변화를 도시한 것으로서 액체 분사 속도의 증가에 따라 초기에는 전반적으로 분열길이는 증가되고 있는 것을 볼 수 있으며, 그 증가폭은 점차 감소되어 나가는 것을 알 수 있다. 또

한 속도가 증가될수록 작은 속도에서는 이들의 난동 정도가 심하진 않지만 속도가 증가될수록 이들의 분산폭은 급증되고 있음을 알 수 있으며, 전반적으로 0.8의 상관도를 유지하고 있는 것을 알 수 있었다. Fig.3-(b)의 그림은 위와 동일한 유량에 2차 분열기구로서 외주 공기를 투입하였을 때의 분열길이의 변화를 관찰한 것으로서 동일 액체 분사 속도(Vw)인 2 m/s의 경우에는 외주 기류가 없는 경우에 비해 작은값을 갖는 것을 알 수 있으며, 공기 속도(Va)의 증가로 질량비가 증가함에 따라 분열길이는 점차 감소되고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상들은 분사 유체의 유량이 증가됨에 따라 주위기체의 상대속도가 증가되기 때문으로 생각된다.

3.2 액량의 증가에 따른 액주의 변화

미립화를 위한 압력식 단공 노즐의 액체 분사에서 분열 정도는 McCarthy와 Molloy에 의한 액체 분류의 안정성 곡선을 만족하는 속도와 유량 그리고 그에 상응하는 분열길이를 가지며, 이들은 노즐의 기하학적 특성에 따라 상사성을 가지며 미립화를 이뤘 나간다. Ranz는 미립화까지의 단계별 분류의 안정성 곡선을 Weber Number로서 표시하였으며, 본 연구는 웨버수에 입각하여 Rayleigh의 선형성을 만족하는 구간내 (We = 0.082 이내)에서 행하였다. 초기 액량은 최소 평활류가 나타나기 시작하는 유량이며, 액량이 증가됨에 따라 Fig.4 에서와 같이 액주의 분열길이는 점차 길어짐을 알 수 있다.

Fig.4-(a)는 전체 액주가 분열이 발생하는 곳을 기점으로하여 분류 방향에 대한 축대칭의 표면파가 나타나고 있으며, 표면은 매끄러운 평활류를 이루고 있음을 관찰을 통해 알 수 있었다. 이러한 표면파의 출현에 대해 Rayleigh는 액주의 불안정 현상이라고 표현하였으며, 분사에 의한 액체의 관성력이 거리에 따라 감소해 나감으로써

액체의 표면장력이 증가되어나가는 것을 의미한다.

Fig.4-(b)는 액체의 분사속도를 증가시켰을 때 표면의 굴곡이 액주의 분열지점 이전에서도 나타나고 있다. 그리고 액주 초기에서는 교란이 일기 시작하며, 동시에 표면파의,축대칭이 깨지고 있는 것을 알 수 있다. 이들은 액주의 표면장력 증가에 의한 수축현상이 액주 상류로 전파되어가고 있음을 의미하며, 주위 기체의 항력을 비교적 적게 받는 영역임에도 불구하고 층류유동상태인 액주가 액량이 증가함에 따라 노즐 내부의 유동에서 발생하는 난류성분에 의해 영향을 받고 있음으로 여겨진다.

Fig.4-(c)에서는 초기 교란영역이 더욱 길어졌으며, 액주는 부분적으로 두께가 가늘어지면서 액주의 하류쪽으로 갈수록 액주의 꼬임에 의한 표면장력의 증가 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. (d)의 그림은 표면장력의 증가 형태가 뚜렷해지고 부분

적으로 표면분출의 형태가 나타나기 시작함을 알 수 있다.

액량이 더욱 증가된 그림 (e)(f)에서는 부분적으로 뭉쳐져 있던 액주가 액막의 형태로 변화되고 있으며, 수직 분출은 더욱 성장하여 분열되고 있음을 알 수 있다. 액막은 단순 액주의 형태보다 주위 공기나 동축 외주 기류와의 접촉면적이 상대적으로 크기 때문에 기류에 의한 분열 과정이 상대적으로 빨라지게 된다. 또한 Fig.4-(d)(e)(f)에서처럼 액막의 생성위치는 분열 길이의 중간에서 주로 발생되며, 이를 전후로 하여 수직액주의 분출과 함께 최대 확산폭을 나타냄을 알 수 있다. 또한 액막이 형성된 이후의 액주는 액사 분열을 발생시킬 정도로 부분적으로 가늘어져 있음을 알 수 있다. 또한 위성액적의 생성은 액주 자체의 난동이 심하지 않는 평활류의 경우에 주로 발생되며, 액량이 많고 교란이 심해진 경우에는 발생이 비교적 적은 것을 알 수 있다.

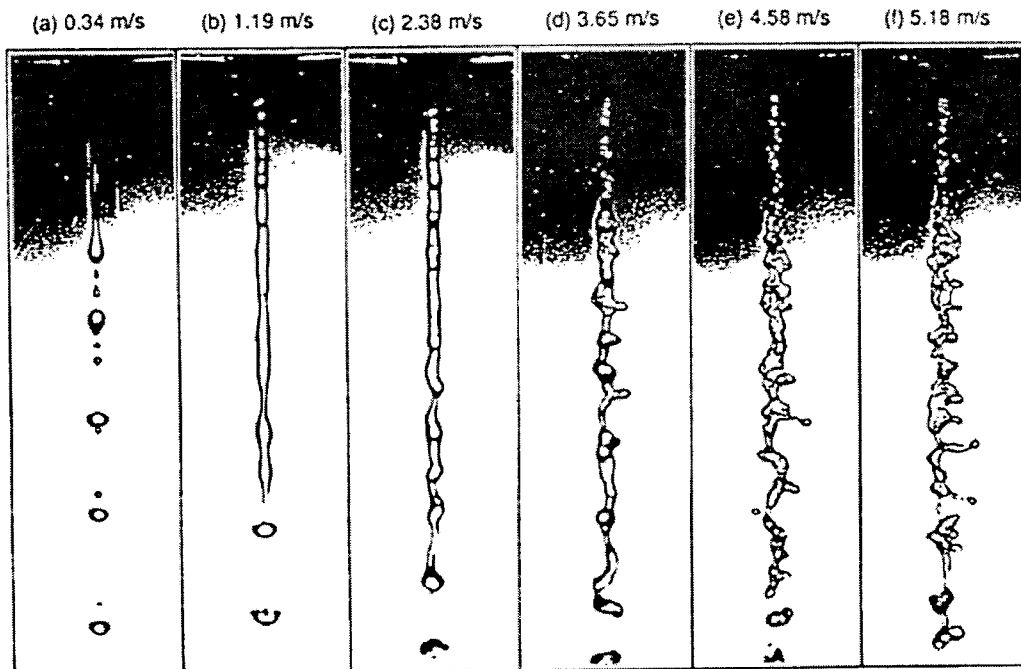


Fig.4 Variation of liquid column with increment of liquid quantity($V_a=0.0m/s$)

3.3 동축 외주 기류에 의한 액주의 변화

여러 가지 질량비에 대해서 공기량의 변화에 따른 액주의 변화를 근접 관찰하였다. 평활류 형성 최소유량에 2차분열기구로서 적은량의 동축외주 기류를 분사시켰을 때, 평활류의 길이는 짧아지고 분리된 액적은 보다 납작해졌음을 알 수 있다.(Fig.5-a)

공기량을 미소량 증가시켰을 때(Fig.5-b), 액주의 선단은 회전을 하면서 액적 분열을 이루고 있으며, 이는 동축기류에 의해 추가된 현상으로써, 기류의 확산이 주위 공기와의 마찰로 인해 난동을 하며 액주와 접촉하여 관성이 약해진 액주의 분열 끝을 선회하게 하는 것으로 보인다.

Fig.5-(c)(d)는 회전에 의해서 표면파의 수축된 부분이 원심 분리되는 듯한 현상을 보여주고 있으며, 분리된 긴 액사의 끝은 내부 중심 쪽을 향하고 있으므로 회전력이 액주 생성에 영향을 끼쳤음을 알 수 있다.

Fig.5-(d)는 공기의 증가에 따라 액주 회전의 시작은 노즐선단에 가까워지며, 회전 반경 역시 작아졌다. 또한 분열된 액적의 수가 비교적 많아졌으며, 액적들의 확산 비행기류가 상대적으로 강하게 접촉하므로 액주의 회전은 좁게, 그리고 액적의 확산은 보다 넓게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig.5-(e)는 공기의 증가로 인해 액주 내부에 교란이 나타나기 시작하며, 분열전의 액주도 비교적 가늘게 늘어져 있음을 알 수 있다. 액주의 길이가 기류의 상대적 접촉에 의해 밀리므로 그 만큼 액주의 관성이 증가되어 액주의 길이가 길어지는 것으로 생각된다.

Fig.5-(f)는 반경방향으로 요동하는 액주가 증가된 기류의 관성에 의해 급격히 꺾어져 내려가므로 액주의 관성이 증가되어 전체 액주의 길이도 더욱 가늘게 길어져 있으며, 분열된 액적들의 크기는 비교적 미세해져 있음을 알 수 있다.

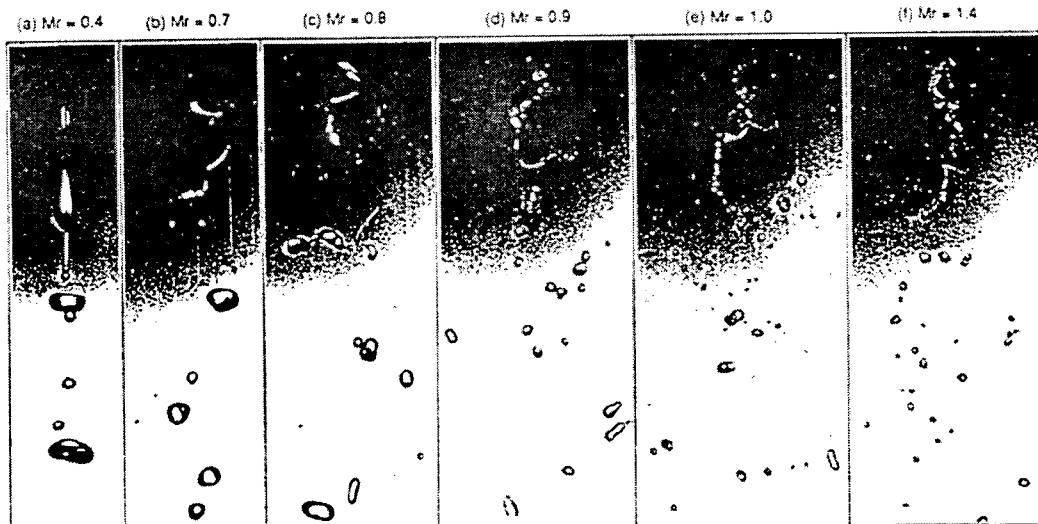


Fig.5 Variation of liquid column with increment of mass ratio($V_w=0.32m/s$)

3.4 분열에 의한 확산

분사식 기관의 실린더 내에서 미립화 입

자가 미치지 못하는 곳의 공기는 연소에 이용되지 못하고 반대로 입자가 밀집하는 곳은 공기가 부족하여 불완전 연소를 일으

킨다. 그러므로 분무는 연소실의 구석구석까지 퍼져나갈 것이 필요하다. 그리고 분무의 확산각이 클수록 포위하는 공기의 체적이 크게 되므로 혼합은 좋아지며, 분무의 확산각 역시 분사 압력, 배압, 노즐의 형상에 관계된다.

동축노즐의 분열 특성은 압력식 단공 노즐에 비해 비교적 적은 유량에서 미립화 특성이 우수하므로 이 유량에서의 액적 직경과 속도측정의 일환으로써 분사에 의한 확산정도를 알아보았다. 확산상태는 측광에 의한 액적의 산란광을 이용하여 사진에 포착하였고 공급 유체의 물성치로는 외주 기류와 액체의 질량비였으며, 액체유량은 액주형성 이전의 적은 유량으로서 $V_w=0.13$ (m/s)이며, 비교적 액체의 분열에 의한 확산각이 뚜렷한 액량에서부터 시작하였다.

분무의 확산 형태는 Fig.6의 (a)(b)(c)처럼 분열 입자의 밀집이 뚜렷한 주 분사 영역

과 이 영역을 경계로하여 산발적으로 외부로 확산되어가는 산란영역으로 크게 대별될 수 있으며, 주 분사 영역은 다시 Fig.6-(c)(d)처럼 분사진행위치에 따라서 초기 확산 부분과 주확산 부분 그리고 분무가 완전히 발달된 확산 지역으로 나눌 수 있음을 관찰을 통해 알 수 있었다. 초기 확산은 노즐에 의한 분사 유체의 내부 밀도가 급팽창되기 때문으로 추정되며, 주확산 영역에서는 팽창된 분사 유체가 내부 교란과 외주 기류의 관성에 실려 정지 기체의 항력을 받으며 계속적으로 분열이 이루어지기 때문으로 여겨진다. 분무의 완전 발달 확산 지역은 비교적 경계가 뚜렷하고 미소하게 확산이 되고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 분사 유체의 초기 분사에 의한 관성력이 정지 기체의 항력에 의해 급감소되는 부분으로 여겨진다.

산란 확산은 Fig.6-(a)(b)에서처럼 전구간에서 초기 확산각을 유지하면서 확산되고

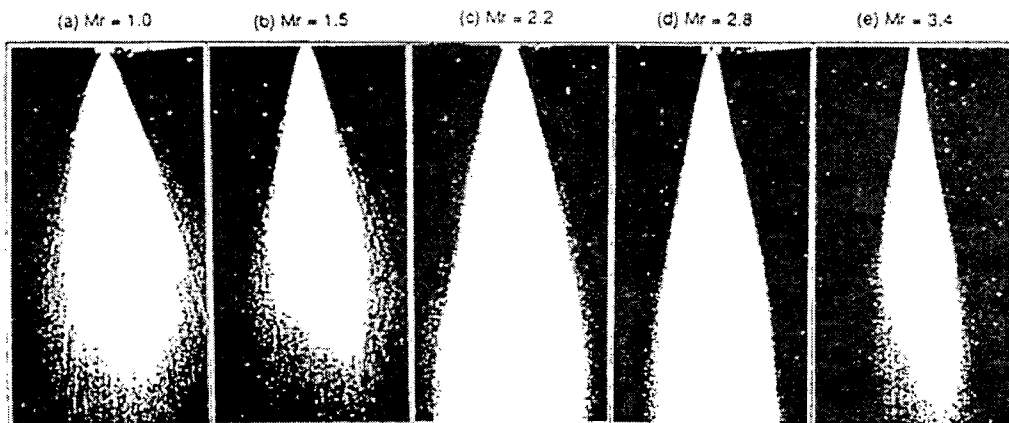


Fig.6 Diffusion phenomena

있는 것을 알 수 있다. 또한 밀집 농도는 주 분사영역에 비해 매우 희박하며 거의 선형적인 확산을 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상들은 액체의 초기 분열에서 발생된 큰액적들이 주분사영역이 시작되는 위치에서 주위 기체와 외주 기류에 의한 전단응력에 의해 외주 기류의 관성에 의한 확산 영역을 벗어나기 때문으로 생각된다.

그리고 산란영역은 질량비가 커감에 따라 점차 주 분사 영역으로 흡수되어가고 있는 것을 알 수 있으며, Fig.6-(c)에서처럼 기류의 관성이 증가됨으로서 초기 확산 영역은 작아지면서 높은 관성에 의해 확산표면은 거의 선형을 이루고 있음을 알 수 있다.

Fig.7은 질량비에 따른 확산폭을 도시한 것으로서 액주의 확산된 분열 형태는 질량

비의 증가에 따라 확산폭은 감소되고 있는 것을 알 수 있으며, 그 감소 정도도 질량비가 증가함에 따라 감소되고 있음을 알 수 있다.

Fig.8은 분사 중심축(X)에서 분류 위치별(Y)로 확산폭을 질량비에 따라 도시한 것으로서 각각 액막 부분의 상당직경(D_{eq})으로 무차원화하였다. 질량비가 작은 쪽일수록 비교적 반경방향으로의 확산이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 초기 확산 부분이 뚜렷이 구분됨을 알 수 있다. 이러한 현상들은 질량비가 증가됨에 따라 분류의 관성력이 증가되기 때문에 주위의 항력을 쉽게 뚫고 나갈 수 있기 때문으로 생각된다.

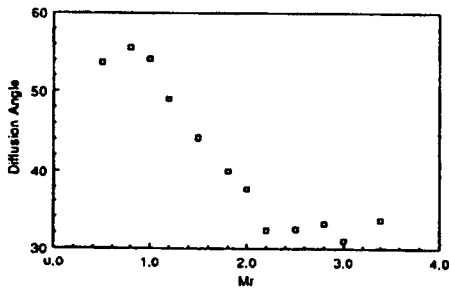


Fig.7 Diffusion angle vs. mass ratio

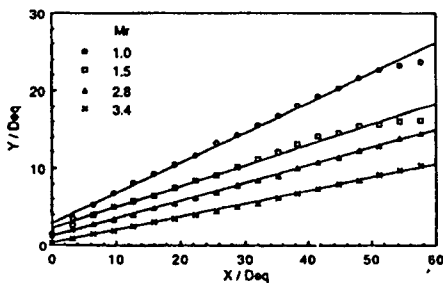


Fig.8 Diffusion rates vs. mass ratio

3.5 분열액적의 크기분포

3.5.1 평균직경 분포

액체 분무의 입자는 액주가 표면장력에 의해 구의 형상을 가진 액적들로 분열된 이

액적들의 크기를 나타내기 위해서 편의상 입자의 직경을 변수로 하는 함수들을 사용하였다. 일반적인 직경의 정의식은 다음과 같으며, 대개 직경의 분포 형태에 맞춰 p, q의 값을 정의 식에 적용하여 산술적 평균 직경, 표면적 평균직경, 체적평균직경등으로 분류하여 사용한다.

$$\overline{(D_{p,q})^{q-p}} = \frac{D^q \int_N(D) \Delta D}{D^p \int_N(D) \Delta D} \quad (1)$$

여기서 \bar{D} 는 평균 직경이고, p, q는 정수이며, f(D)는 분무의 액적의 크기를 나타내는 함수이다. ΔD는 구간의 크기이다.

이때, p=0, q=1인 경우는 산술적 평균으로서 이 평균직경은 액적의 크기분포가 그 값에 비하여 매우 크거나 매우 작은 값을 나타내지 않을 때 중요성을 갖는다.

본 과정에서는 체적-표면적 평균직경 (volume-surface mean diameter, sauter mean diameter, SMD) 을 적용하였으며, p의 값이 2, q의 값이 3인 경우를 조합으로써 그의 구성은 다음식과 같다.

$$\bar{D}_{32} = \frac{D^3 \int_N(D) \Delta D}{D^2 \int_N(D) \Delta D} \quad (2)$$

대표값은 10단위의 중간값을 사용하였고, 표본수는 Image Processing 이 가능한 확대 배율에서 100회 포집을 원칙으로 하였으며, 최대 3000개에서 최소 600개까지의 액적이 포집되었다.

Fig.9의 (a)는 질량비에 따른 분사 진행거리별 SMD의 크기 분포(D_vs)를 도시한 것으로서 대체적으로 질량비의 증가에 따라 액적의 크기는 감소해나가고 있는 것을 알 수 있다.

최소 질량비인 1.0의 조건에서는 포집한 위치의 증가에 따라 액적의 크기가 대체적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있지만, X/Deq 가 100.0인 것은 133.3의 것보다 직경이 작게 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 분사 진행 거리에 따라 질량비

의 증가에 따른 분열 액적의 관성력이 증가되어 난류성이 증대되고, 액적의 난류 성분과 분열 입자의 밀집도의 증가에 의한 상호 충돌에 의해 액적들간의 합착 현상이 발생된 것으로 생각된다.

그리고 분사거리 33.3의 위치에서는 질량비 변화에 비해 직경의 크기 변화가 크게 나타나고, 반면에 분사 노즐로부터 가장 멀리 떨어진 133.3 위치에서의 액적 크기는 질량비 변화에 대해 완만한 감소 형태를 보이지만 질량비 1.5이후에서 분사 거리중에 가장 큰 직경 분포를 나타내고 있다. 이 현상 역시 증가된 관성력에 의한 지속적인 분열에 의해 단면적에 대한 입자의 수밀도가 증대되어 입자의 난동에 의한 입자들간의 합착현상으로 발생된 것으로 생각된다.

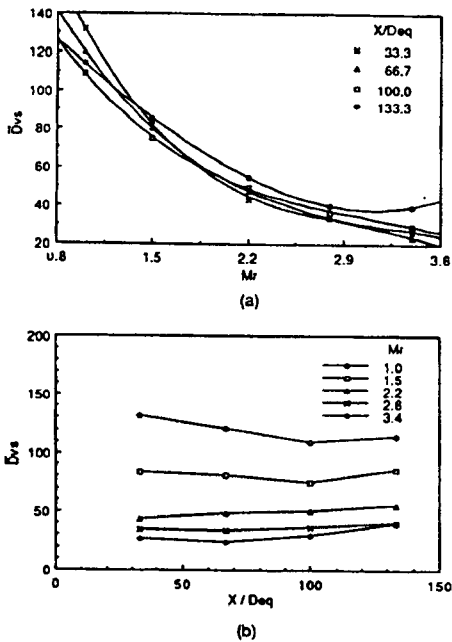


Fig.9 SMD distribution of droplets

Fig.9-(b)는 분사 진행거리에 대한 질량비 별 입자의 직경크기 분포를 나타낸 것으로서 질량비가 작은 조건들인 1.0과 1.5에서는 노즐로부터 멀어짐에 따라 감소하며,

2.8과 3.4의 경우의 초기에는 직경이 약간씩 감소되어나가는 것을 알 수 있다. 이것은 작은 질량비의 경우는 거리에 따라 난류강도의 값들이 급증되기 때문에 이로 인해 주위 기체와의 전단응력이 크게 작용되기 때문으로 생각되며 큰 질량비 경우는 외주 기류의 증가로 상대 속도가 크게 작용되었기 때문으로 생각된다.

그러나 작은 질량비의 분무 하류와 질량비가 큰 범위인 2.2에서는 거리의 증가에 따라 선형적으로 미소량적으로 미소량씩 증가되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 질량비가 2.8과 3.4의 경우에 $X/Deq=66.7$ 위치 이후에서 다시 증가되어 나가는 것을 알 수 있다. 이것은 거리가 멀어짐에 따라 관성력이 약해지고 이에 따라 주위 기체의 항력이 커지게 됨으로 분열된 입자들이 상호접촉하여 합착되기 때문으로 생각된다. 또한 액적들의 크기가 증가되는 위치도 질량비가 클수록 노즐에 가까운 쪽에서 나타나는 것을 알 수 있다.

이상을 종합하여 볼 때 질량비가 큰 조건에서는 분무의 상류쪽으로 갈수록 동축기류에 의한 상대속도가 크고 액적간의 합착 정도도 작아지므로 비교적 미립화가 잘 이루어지며, 질량비가 작은 쪽에서는 분사 하류의 300의 위치에서 액적의 크기가 가장 작게 형성되는 것을 알 수 있다.

3.5.2 분열액적의 분산

정해진 횡수에 상응해서 포집된 액적들은 각각의 개별 직경을 가지고 있음 이들은 평균 직경과는 약간씩의 차이를 보이면서 직경분포를 형성하고 있다. 동일 질량비와 동일 위치에서 이들은 평균값을 기준으로 하여 산만하게 분포되어 있으며 여러 가지 크기의 입자들이 동일 시간내에 동시에 존재하고 있다는 것을 의미할 수 있다. 이것은 또한 각기 다른 상태의 분열 조건으로 분열이 이뤄졌기 때문이며 여기서 각각의 다른 상태의 조건이란 액주의 선단에서 분열된 액적과 파생적으로 발생하는 위성 액적 그리고 액사의 발생과 액주 둘레의 액

막 형성등인 액체의 분열과정에서 동시에 존재하기 때문으로 생각된다. 이렇게 불균일한 크기들의 동시 생성은 결국 연소한 분무에서 화염의 전파속도를 불규칙하게 만들뿐 아니라 심지어 미연소되는 잔류액적이 생길 수 있게 된다.

본 연구에서는 이들 액적 크기의 고른 분포 정도를 알아보기 위하여 액적들의 각각 크기를 전체의 산술 평균과 비교하여 그 표준편(S.D.vs)차를 도시하여 보았다.

Fig.10-(a)는 유동축내의 각각의 위치에서 분사 유체의 질량비의 변화에 따라 파동의 크기를 도시한 것으로서 전반적으로 질량비의 증가에 따라 감소하고 있으며, 미소한 차이들을 이루고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 질량비가 증가함에 따라 분류의 관성력이 커졌기 때문이다.

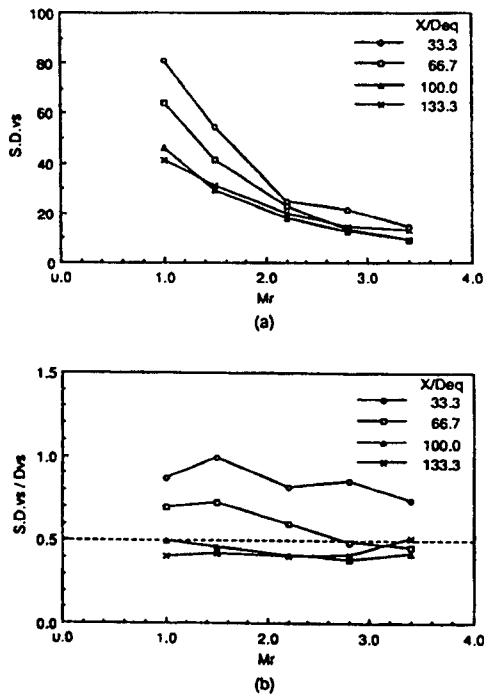


Fig.10 Dispersion distribution of droplets size

작은 질량비에서는 축방향 거리가 노즐쪽에 가까운 위치일수록 먼 위치보다 파동의 정도가 큼을 알 수 있으며, 질량비가 증가

해 나감에 따라 전체의 파동정도는 감소해 나가지만 Fig.10-(b)와 같이 산술평균에 의해 무차원되면, 위치별로는 노즐에서 멀리 떨어진 쪽일수록 파동의 정도가 가까운 위치에 비해 커지고있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 질량비가 분류 관성력에 비해 하기 때문으로 여겨지며, 또한 주위 기체의 항력이 관성력에 영향을 미치는 위치와 비례하기 때문으로 생각된다.

3.6 액적의 평균속도분포

분무 액적의 평균속도 분포는 분열 기구에 의하여 공기 분사 속도 노즐 선단부의 확산 각 노즐 선단으로부터의 거리 등이 지배 변수로써 작용하게 되며, 노즐로부터 거리의 감소, 그리고 질량비의 증가에 따라 평균 속도는 전반적으로 증가하는 현상을 보여 주고 있다. 또한 중심부에서는 분무 단면의 평균속도보다 큰 값을 나타내고 있는데, 이는 공기가 분출되면서 노즐의 중심부로 유입되기 때문이다.

평균속도가 질량비에 비례하게 되는 현상은 분사된 공기가 운동량의 증가에 따라 분열되는 액적들의 확산정도를 제어하게 되어 액적들의 반경방향 속도 성분을 감소시키기 때문으로 생각된다. Fig.11은 질량비의 변화에 따라 노즐로부터의 거리별로 측정된 축방향 속도 값으로써 각각 분류 중심에서의 속도값(Uc1)과 분류 반쪽(b)으로써 무차원화 하였다 그 결과 축 중심에서는 분류 단면에서 최대의 속도값을 나타내고 있으며, 반경 방향으로 갈수록 축방향 속도 값은 점차 감소되어 나가고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Gauss의 정규 분포 형태의 유사하게 반경방향으로 갈수록 분류에 의한 관성이 약해졌음으로 생각된다. 그리고 노즐로부터의 거리인 X는 노즐 액막부분의 상당지경으로써 무차원화 하였다. X/Deq=33.3 에서는 분류 중심의 밖에서 최대값을 나타내고 있는 것으로 보아 이 위치에서는 아직 액막형에 의

한 속도 분포가 존재하므로 saddle형을 유지하고 있는 것으로 생각된다.

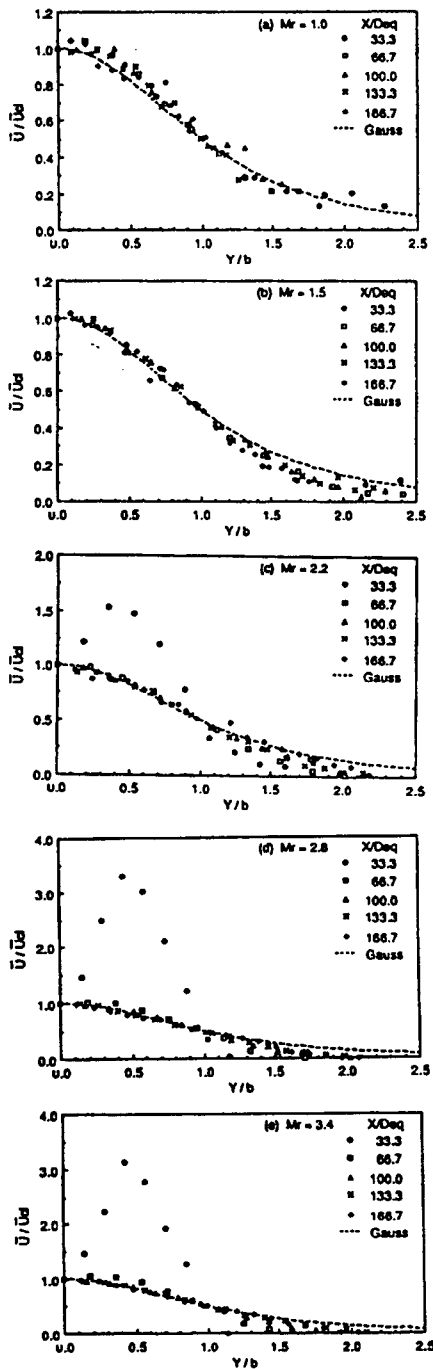


Fig.11 Mean velocity distribution

4. 결론

- (1) 액주의 분열과정 변화 관찰 실험에서 액량의 증가에 따라 표면의 굴곡은 액주의 선단으로부터 상류쪽으로 전파되며 액주의 교란이 심해지고 액막과 수직 분출의 형성이 뚜렷해져감을 알 수 있다.
- (2) 동축 외주 기류의 증가에 따라 액주는 선회하게 되고 액주의 다면 두께는 점차 가늘어 지며 액적의 직경은 점차 미세해져 분열은 급진적으로 확산되어 감을 알 수 있었다.
- (3) 주 분사 영역은 분사 진행 위치에 따라서 초기 확산 부분과 주 확산 부분 그리고 분무가 완전히 커감에 따라 점차 주 분사 영역으로 흡수되어 가고 있는 것을 알 수 있었다.
- (4) 분열된 액적의 직경은 질량비의 증가와 노즐로부터의 거리가 멀어짐에 따라 감소 되어가고 있으나 가장면 위치에서는 다시 분열된 입자간의 합착 현상이 나타나고 있으며 질량비가 클수록 합착 현상의 발생 위치는 노즐쪽에 가까워짐을 알 수 있었다.
- (5) 분열 액적들의 분사에 의한 난류성 속도 분포는 노즐에 가까운 위치에서는 액막 형의 분류에 의한 saddle형을 나타내고 있으며 상당직경에 66.7배 이상인 곳의 이후에서는 위치별로 상사성을 유지하고 있는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. F. R. Gomez, "Experimental and Theoretical Analysis of High Speed Atomization and its Application to Diesel Fuel Injection," Ph. D. Dissertation. Carnegie Mellon University.
2. S. Zanelli, "Behaviour of a Liquid Jet near the Nozzle," ICLASS-88, pp. 1-14, Aug. 1988.
3. E. Blumcke, H. Eickhoff and C. Hassa, "Dispersion of Monosized Droplets in a

Turbulent Swirling Flow," ICLASS-88, pp. 89-96, Aug. 1988

4. S. Shiga, H. Koshiba, Y. Karasawa and T. Kurabayashi, "A Study of Fissel Spray Formation with Unsteady Higher Injection Pressure," ICLASS-88, pp. 397-404, Aug. 1988

5. 강신재 "LDA시스템에 의한 45° 확산형 동축 2상 분무의 난류혼합유동에 관한 실험적 연구," 전북대학교 대학원 공학 박사 학위 논문, Feb. 1991

6. P. H. Schweitzer, "Mechanism of Disintegration of Liquid Jets", J. of Applied Physics, Vol. 8, pp. 513-521, 1937

7. R. Sadak. comment, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineerings, Vol. 173, No. 25, 1959

8. J. H. Rupe, "On the Dynamic Characteristics of Free-Liquid Jets and a Partial Correlation with Orifice Geometry," Technical report, pp. 32-207, 1962.

9. W. Bergwerk, "Flow Pattern in Diesel Nozzle Spray Holes", Proceeding of the Institution of Mechanical Engineer, Vol. 173, pp. 655-660, 1959.