

〈논문〉 SAE NO. 943747

노즐부근에서의 비정상분무 거동

Observations on the Near-Nozzle Behavior of an Unsteady Fuel Spray

구 자 예,* 정 홍 철**
J. Y. Koo, H. C. Chung

ABSTRACT

Observations on the near-nozzle behavior of an unsteady fuel spray through single cylindrical hole nozzle were made by phase Doppler anemometer and microphotographs. At the edge of the spray, droplet velocities have shown wave-like behavior. The average droplet velocity peaked during needle opening and closing. Droplet sizes tended to be small on the edge of spray. The near-nozzle spray angle taken from the microphotographs was time-dependent, even though it increased with gas-to-liquid density ratio as expected. The near-nozzle spray angle was the greatest on the initial stage and decreased to a relatively constant value after about one third of the total injection duration regardless of the ambient gas conditions, even in the near-vacuum condition. The wider near-nozzle spray angle in the early stage is due to the flow characteristics inside the nozzle rather than aerodynamic interactions. However, once the spray was established, aerodynamic interactions are essential in the near-nozzle atomization.

주요기술용어 : Near-nozzle Behavior(노즐부근 거동), Unsteady Fuel Spray(비정상 연료분무), Droplet Size and Velocity(액적 크기 및 속도), Microphotograph(미세구조사진), Near-nozzle Spray Angle(노즐부근 분무각)

1. 서 론

엔진의 성능을 향상시키고 유해배출가스를 감소시키기 위한 연소개선을 위하여서는 각종 원동기에 사용되는 연료분무의 미립화과정을 자세하게 이해하여야 한다. 디젤엔진, 포트분사식 가솔린엔진등에서는 비정상(unsteady), 간헐적인(intermittent) 분사방식이 채택되고 있으며 정상

연속분사와는 그 특성이 다르다. 분무의 거시적인 특성으로는 분무의 선단도달거리(tip penetration), 분무각(spray angle)등이 있으며, 미시적인 특성으로는 연료액적입자의 크기, 속도 및 입자 상호간의 충돌 등을 들 수 있다. 이와 같은 분무특성은 연소실내에서의 연료분포를 결정하는 지배적인 요소들이며, 연소실내에서의 연료분포는 이후에 일어나는 일련의 과정들 즉 혼합기형

* 정회원, 한국항공대학교 항공기계공학과
** 한국항공대학교 항공우주공학과

성, 점화특성, 연소율 및 엔진효율과 배기가스에 영향을 미치는 첫인자이다. 미립화가 잘된 연료는 혼합기형성과정에서 빨리 혼합기를 만들어서 디젤기관의 점화를 촉진시켜 연소효율을 높이고 유해배출가스의 생성을 줄인다. 분무의 특성에 영향을 미치는 변수로는 연료노즐의 상부조건과 하부조건인 연소실 상태와 연료의 밀도, 점도, 표면장력등의 물성치 등이다. 연료노즐의 상부조건으로는 연료펌프의 속도, 연료라인의 압력, 노즐의 형상 등이 있으며, 하부조건인 연소실상태로는 연소실 주위가스의 온도, 압력 및 밀도 등이다.

디젤분무는 광학적으로 농후(optically dense)하기 때문에 지금까지 분무의 연구는 주로 노즐 출구에서 멀리 떨어진 곳이나 노즐근방에서는 분무가 아주 엷은(dilute) 가장자리에서 주로 연구되어 왔으며,^(1,3) 노즐근방의 중심축상에서는 통상적인 방법으로는 측정이나 관찰이 거의 불가능하였다. 그러나 노즐근방의 분무는 실제적으로나 컴퓨터에 의한 해석적 연구에서도 상당한 중요성을 가진다. 연소실내에서 분사 압력이 75 MPa인 경우, 오직 점화는 노즐부근에만 있었고, 분사압력이 90MPa 이상인 경우는 하방 다른 곳에서도 점화를 볼 수 있었다.⁽⁴⁾ 또한 처음에 분사된 연료 액적은 분무 가장자리의 다소 엷은 부분에서 주위가스와 물질, 모멘텀 및 에너지 교환을 통해서 가연성 혼합기를 만들어 다른 연료가 점화하기전에 자연 발화할 수 있는 조건이 된다. KIVA 프로그램과 같은 컴퓨터를 이용하여 분무를 연구할 때는 초기조건으로서 반드시 노즐근방에서의 초기상태의 액적의 크기 및 속도의 통계적인 정보를 제공하거나 연료액주에서 개개의 액적으로 분열하는 분열(break up)모델이 있어야 한다.⁽⁵⁾ 분열모델의 신뢰성을 높이기 위해서는 분열모델에 의해서 생긴 액적의 크기 및 속도는 측정된 값과 비교 검증될 필요가 있다. 노즐근방에서 비교검증을 하면 2차 분열이나 액적입자 상호간의 충돌 및 응집의 영향을 더 배제할 수 있다. 이와 같이 노즐근방에서의 분무의 특성을 고찰하는 중요성이 더해가므로 여기서는 위상도플러입자측정기(Phase Doppler Particle

Analyzer : PDPA)를 사용하여 액적입자의 크기와 속도를 동시에 측정 하였고, 동일 분무에서 미세구조를 관찰할 수 있도록 확대사진(microphotographs or magnified photograph)을 촬영하여 비정상 간헐적인 분무를 관찰하였다. 노즐근방에서 관찰된 분무현상을 보다 잘 설명하기 위해 분무의 상부 조건인 순간적인 노즐내부압력, 니들의 위치, 분사율을 측정하고 순간적인 유량계 수도 구하였다. 또 측정 데이터와 함께 노즐내부유동 계산결과를 사용하여 미립화 현상을 설명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

위상도플러입자측정기를 사용하여 분무액적의 크기 및 속도를 측정하고, 분무사진 촬영을 위하여서는 분무실의 양쪽에 직경 10mm의 쿼츠 유리창(quartz window)을 두어 광학적으로 접근이 가능하도록 하였으며, 분무실은 45MPa까지 견딜 수 있도록 제작 되었다. 분무실과 분사장치의 구성도는 Fig.1과 같다. 측정을 연속적으로 할 때 쿼츠 유리창이 쉬이 더러워지는 것을 방지하기 위해 필요시만 분무가 주 분무실로 분사되도록 장치를 구성하였다. 측정이 불필요할 경우 펌프에서 공급된 연료는 보조 분무실로 갈 수 있도록 하였으며, 주 분무실과 보조 분무실로의 연료공급 제어는 솔레노이드 밸브를 PC로 제어하여 정확성을 기하였다. 연료분사 펌프는 직렬저크식(in-line jerk type) 4기통 펌프인데 DC 모터로 구동하였으며 연료의 출구는 하나만 사용하고 나머지는 막았다. 실험에 사용된 노즐은 단공노즐로 오리피스 직경이 0.24mm 및 0.41mm의 두 종류가 사용되었으며 노즐의 형상비(길이-직경비, L/d)는 각각 3.3과 1.95이다. 실험은 상온에서 수행하였으며 분무실의 압력은 거의 진공상태로부터 0.1, 0.45, 1.34 그리고 2.1MPa까지 다섯가지 상태로 변화시켰다. 이때 주위가스 밀도와 연료액체의 밀도비(ρ_p/ρ_g)는 각각 0, 1.37×10^{-3} , 6.0×10^{-3} , 18.1×10^{-3} , 29.2×10^{-3} 에 해당한다. 실제 디젤엔진에서 점화할 때의 가스압력은 50-

80 기압 정도이며 가스온도는 800-100°K 정도이기 때문에 실험에서 사용한 압력은 실제보다 많이 낮은 것 같이 보인다. 그러나 미립화나 분무발달의 주요변수는 주위가스 압력과 연료 분사압력의 비율보다는 주위가스 밀도와 연료액체의 밀도비(ρ_p/ρ_l)라고 알려져 있기 때문에⁽⁵⁾ 이 밀도비는 분무와 주위 공기와의 상호 작용을 없애기 위한 거의 진공 상태에서부터 실제 연소실에서 연료액적이 점화할 때까지의 밀도비에 가까운 전 범위를 포함한다. 연료액적의 크기와 속도는 Ae-rometrics사 제품인 PDPA를 사용하였으며 Fig.2에 PDPA의 구성도를 나타내었다. 간헐적이며 시간

적으로 변동하는 분무를 측정하기 위해 연료분사펌프에 12 bit encoder를 장착하여 연료펌프내 캠의 위치를 알수 있도록 하였으며 이 신호는 PDPA의 신호처리장치(signal processor)와 조합되어 데이터를 시간의 함수로 나타낼 수 있도록 하였다. Fig.3은 확대사진을 촬영하기 위한 광학적 배열을 나타낸 것으로 산란방법(scattering setup)에 의해서 분무사진을 기록한다. 분무는 아주 짧은 펄스광원(short pulse duration source)에 의해 조명되며 산란된 상(image)은 필름(film)에 기록된다. 광원으로 Oxford lasers 제품인 Copper-vapor 레이저($\lambda=512$ & 578nm)를 사용하였으며 펄스광원의 조명기간(duration)은 20-60nsec이다. 이 레이저의 출력은 0.4-0.8mJ이며 레이저는 16mm 카메라와 동기(synchronized)되어서 원하는 분무의 위치를 순간적으로 고정(freezing)된 형태의 분무 구조로 관찰할 수 있었다. 이들의 위치 측정을 위해서는 Hall-effect transducer가 사용되었으며 노즐 압력은 노즐 배열에 스트레인 게이지(strain gage)를 심어 원주돌레의 스트레인(hoop strain)을 측정하여 교정한 후 압력으로 변화시켜 알 수 있었다. 연료 분사율은 보쉬식(Bosch type)의 분사율 측정기(rate of injection meter)를 제작하여 측정하였다.

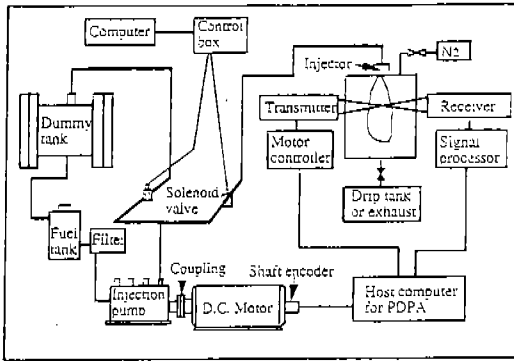


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

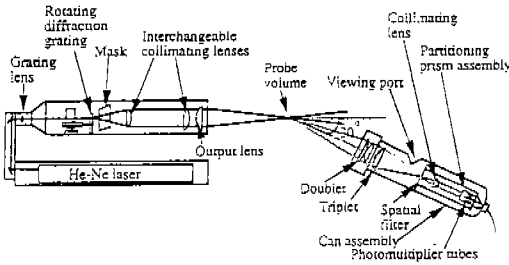


Fig.2 Optical diagram of the Phase/Doppler Particle Analyzer(PDPA)

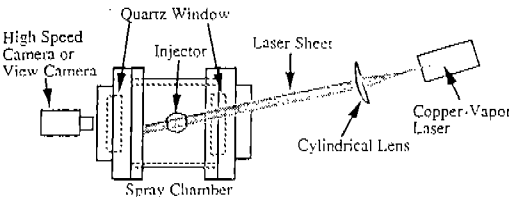


Fig.3 Schematic of scattering setup(Top view)

2.2 액적 속도 및 크기의 동시 측정과 위상 평균

광학적 계측기를 이용하여 디젤 분무액적의 속도 및 크기를 측정하는 것은 분무가 광학적으로 농후하기 때문에 상당한 어려움을 내포하고 있으며 측정 데이터에 오류가 발생하기 쉽다. 특히 노즐부근의 분무 중심축상에서의 측정은 어려움을 배가시킨다. 노즐근방식의 중심축상에서는 분무의 미립화 측 분열이 계속되고 있으며, 분열된 액적들은 비규칙적이고 원형이 아닌 여러 가지의 모양과 크기를 가지고 있기 때문에 PDPA를 이용하여 액적을 측정할때는 Photo-Multiplier Tube(PMT)전압 및 frequency shift를 적절하게 선정하여야 한다. PDPA를 이용할 때 액적은 원형에 가까워야 하며, 단위측정 시간에 측정체적내에서는 단일 액적이어야 하며(counter

processor 경우), 필터 및 광학적 선택에 의해 정해지는 측정 가능범위내에 측정값이 있어야 한다. 농후한 고밀도 액적의 측정을 위해서는 측정체적이 가능한 작아야 한다. 이를 위해서는 직경이 큰 collimating lens와 초점거리가 짧은 output lens를 선택하여 transmitter를 통과한 beam의 직경을 작게 해 주어야 하며, receiver에서는 액적들이 감지될 수 있는 범위내에서 PMT전압을 낮추고 작은 spatial filter를 사용하는 것이 좋다. 한편 노즐부근 중심축상에서는 노즐 크기정도의 큰 액적도 존재하기 때문에 beam의 직경이 측정 액적보다 커야 한다. 이 두 조건은 서로 모순되므로 분무의 조건과 측정위치에 따라 여러가지 광학적 선택을 변경시키고, PMT전압 및 frequ-

ncy shift를 변화 시켜가면서 예비 실험을 한 후 데이터를 얻었다. Fig.4는 노즐부근 중심축상에서 PMT전압 변화에 따른 측정 데이터의 예를 나타낸 것이며 PMT전압이 너무 낮으면(320 경우) 작은 액적을 detector가 감지 할 수 없고, PMT전압이 너무 높으면(430 경우) noise를 데이터로 오판하여 액적으로 나타낼 수도 있다. 분사종류 이후의 상당한 크기의 속도를 나타내는 데이터는 전부 noise에 의한 것임을 알 수 있다.

각 측정시 마다 많은 data가 취해지고 또한 분사도 1회가 아닌 반복적으로 여러 번을 분사한 data를 전부 취하여 결과를 해석하므로 위상 평균(phase average) 혹은 앙상블 평균(ensemble average)을 취해야 한다.

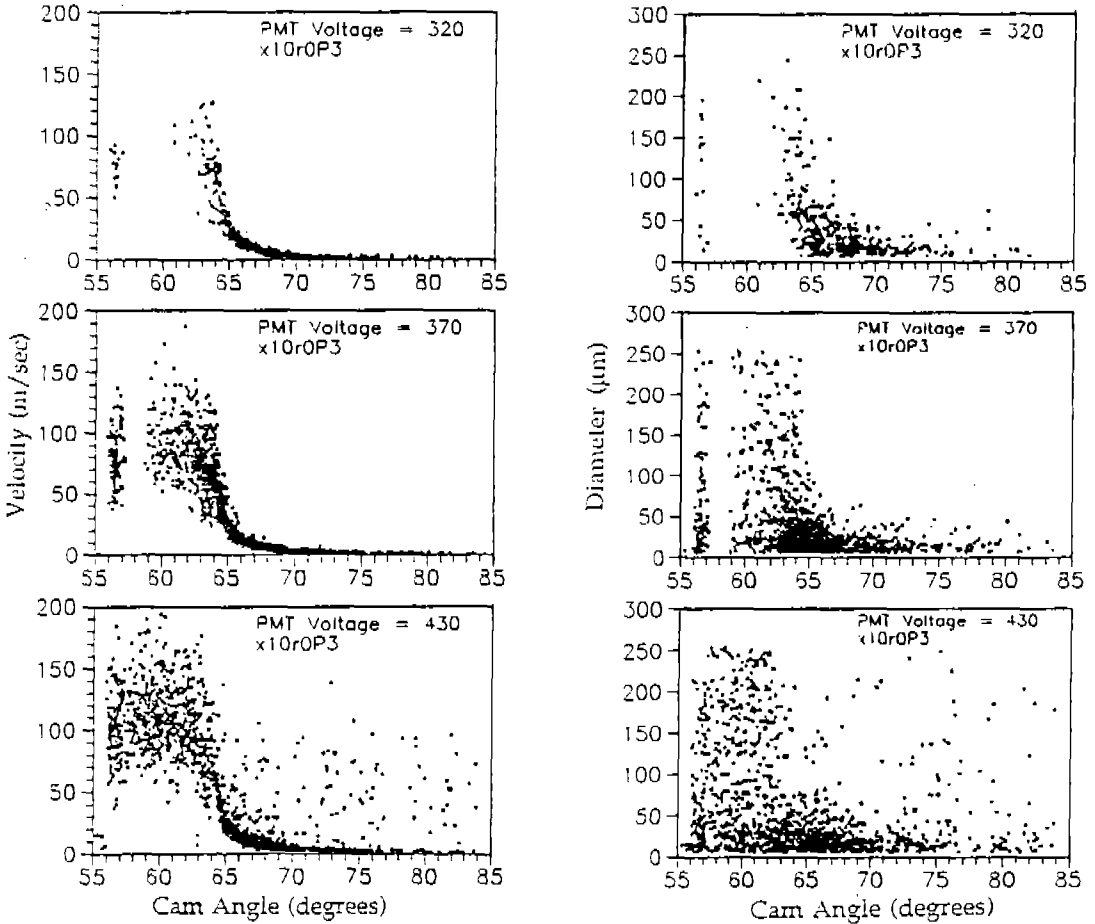


Fig.4 Effect of PMT voltage on PDPA raw data. Measurement position and condition $x=10\text{mm}$, $r=0\text{mm}$, $P_{\text{gas}}=1.34\text{MPa}$

평균속도(U), 속도변화(U_{ms}), Sauter평균직경(D_{32}), 및 산술 평균 직경(D_{10})은 펌프의 각 위치에서의 위치변위, 즉 캠각도(cam angle)로 $\Delta\theta$ 만큼의 기간동안에 데이터를 취하여 그 값을 평균하였다.

액적 속도에 대하여서는 다음과 같이 구하였다.

$$U(\bar{\theta}, \Delta\theta) = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} U_{ij} \left(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (1)$$

여기서 $\bar{\theta}$ 는 캠각도의 위치이며 $\Delta\theta$ 는 평균하는 범위(window)이다. 또 N_c 는 평균한 분사 횟수이며 N_d 는 i 번째 사이클 동안 취한 데이터의 수이고 N_i 는 총 데이터의 수이다.

$$U_{ms}(\bar{\theta}, \Delta\theta) = \left[\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} u_{ij}^2 \left(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서 $u_{ij} = U_{ij} - U$ 이다.

액적의 크기에 대한 평균값은 다음과 같이 구하였다.

$$D_{32}(\bar{\theta}, \Delta\theta) = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} D_{ij}^3 \left(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2} \right)}{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} D_{ij}^2 \left(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2} \right)} \quad (3)$$

$$D_{10}(\bar{\theta}, \Delta\theta) = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} D_{ij} \left(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2} \right)}{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} j} \quad (4)$$

위상평균 data 수는 4000-8000개이며 이들의 분사횟수는 측정 위치에 따라 50-500회 정도였다.

2.3 노즐부근 분무각

분무의 광산란(scattering)이나 광소멸(extinction)에 의해 필름 위에 나타나는 분무의 영상(image)은 카메라의 aperture크기(f-number)에 의존하기 때문에 분무각이나 분무선단도달거리를 분무사진으로부터 측정할 때는 동일한 광학적 조건에서 비교하여야 한다. 주어진 노출시간에서 필름의 노출정도는 f 수 제곱에 반비례하며, 노

출시간은 광원으로 쓰이는 레이저 펄스의 발광 기간(duration)에 의해 제한된다. 분무 plume은 매 분사마다 동일하게 발달하지 않고 조금씩 변화하기 때문에 10회 이상의 데이터를 평균하여 구하였다. 정상상태에서 분무각의 측정은 분무가 연소실로 분출되어 분무선단이 20-50mm까지 진행된 후의 분무사진으로부터 측정한다. 비정상분무에서는 분무의 순간을 펄스 레이저로 고정(freezing)시켜서 측정한다. 통상의 분무각은 노즐선단으로부터 20-50mm 영역의 분무사진에서 조사하였으나 노즐부근 분무각은 미세구조 확대 사진에서 노즐출구로부터 10mm 정도까지의 분무 plume에서 측정한 값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액적 입자 크기 및 속도

Fig.5는 노즐직경이 0.24mm이며 분사되는 질량이 1회당 9mg인 경우의 분사압력, 니들의 위치, 분사율, 유량계수 및 예측되는 분무의 속도를 나타낸다. 인젝터 내부에 있는 sac체적내의 급격한 압력 상승과 함께 분사 과정이 시작되는데 압력이 어느 일정 압력 이상이 되면 니들이 열리고 분사가 시작된다. 일단 니들이 완전히 열린 후에는 압력이 점차로 감소하는 것을 알 수 있다. 노즐 출구에서 평균출구속도는 150m/sec이며, 레이놀즈수는 1.56×10^4 이다. 분사는 약 55CA (Cam Angle)에서 시작하여 63CA에서 종료됨을 알 수 있다.

Fig.6은 대기압 상태인 주위공기로 분출하는 분무($\rho_g/\rho_l = 1.37 \times 10^{-3}$)를 노즐선단에서 10mm 떨어진($x=10$ mm) 같은 중심축상에서 반경 방향으로 다른 두 점($r=0$ mm, $r=15$ mm)을 측정점으로 하여 얻은 액적 입자의 위상 속도들과 위상평균 직경들을 나타낸다. Fig.7은 PDPA로부터 얻은 액적의 속도, 크기와 이들의 상관관계의 raw data를 나타낸다. Fig.8의 분무 중심축상($r=0$ mm)에서의 액적 속도 분포는 캠각도로 볼 때 상당 기간 준정상(quasi-steady)상태를 나타내지만 중심축상에서 분무 가장자리로 갈수록 액적 속도는 분사시간에 따라 변화한다. 노즐부근의 분무중

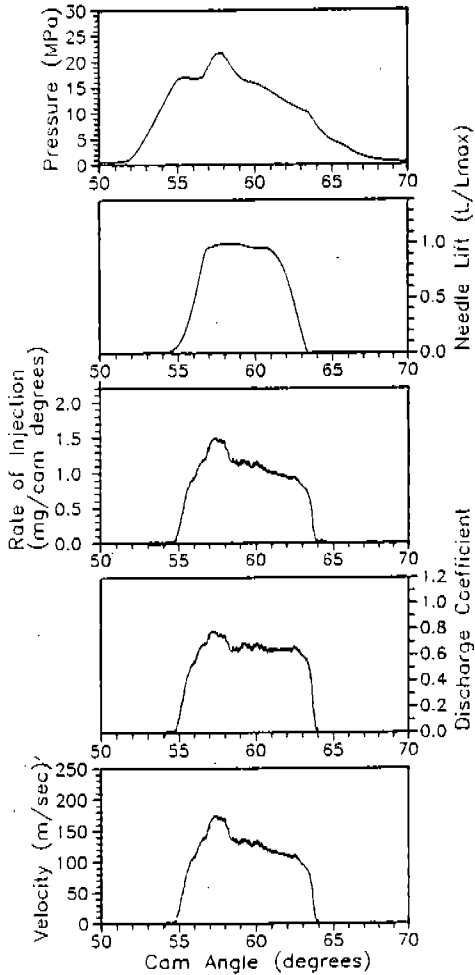


Fig.5 Crank-angle resolved nozzle tip pressure, needle lift, rate of injection, discharge coefficient, and estimated average fuel jet velocity at nozzle exit

심축상에서 분무실의 압력이 높아질수록(Fig.9) 분무가 광학적으로 농후하기 때문에 분무선단이 통과한 직후인 57CA 부터 59CA까지 약 2CA 동안은 데이터가 없는것 처럼 보인다. 전술한 바와 같이(2.2절) 노즐부근의 분무중심축상에서는 완전한 데이터를 얻기가 쉽지 않음을 알 수 있다. 그러나 실험조건에 가장 적합한 실험장치 변수들(optics, PMT전압, frequency shift등)을 선정하여 이제까지는 거의 광학적 측정이 불가능하였던 노즐부근의 분무중심축 영역에서도 액적속도와

크기를 측정하였다. 노즐부근의 분무중심축상에서 액적의 크기는 분무실의 압력에 관계없이 측정가능 최소크기(약 2 μ m)로 부터 노즐직경(240 μ m)의 크기까지 존재함을 알 수 있다. Fig.6의 $r=1.5$ mm인 분무가장자리에서는 액적 입자의 속도를 분무 시간(여기서는 cam angle로 표시됨)상으로 살펴볼 때 분무선단의 바로 직후에 속도 최대치를 한 번 나타낸 후 바로 떨어지기 시작하여 분무 종료 이전에 두번째의 정점(peak)을 나타내는 파동현상(wave-like behavior)을 발견하게 된다. Cossali⁽⁶⁾도 반경방향에서 축방향 속도를 측정하였을 때 분무 선단과 말기에서 속도의 정점(peak)을 나타내는 파동현상을 발견하였다. 분무 선단과 말기에서 반경방향의 속도는 분무의 중심축에서 반경방향으로 흐르지만, 분무 선단과 말기 사이의 중간부분은 공기유입(air entrainment)이 우세하기 때문에 반경방향의 속도는 분무 중심축상으로 흐르는 것을 확인하였다.

변동속도 성분의 rms(root mean square)값도 Fig.6에 나타나 있다. 여기서는 rms 속도성분은 gas-phase의 변동(fluctuation)이 아니고 각 크기에 해당하는 액적 속도 변화를 나타낸다. 액적 속도가 변하는 주된 이유는 분무의 미립화시에 생기는 여러 종류의 액적 크기에 따른 다른 drag/momentum 비율에 기인한다. Fig.6에서 rms 속도 성분은 분무의 선단(tip)에서는 작으며 분무의 중간 부분에서는 증가하여 거의 일정한 값을 이루다가 분무가 종료되는 말기에는 급격히 감소한다. Fig.6에서 rms강도(U_{rms}/U)는 분무중심보다 가장자리에서 증가함을 알 수 있다. 분무 중심축($r=0$ mm)의 액적 크기는 선단에서는 거의 일정하다가 분무 말기로 가면서 액적 크기는 감소한다. 그러나, 분무 가장자리($r=1.5$ mm)의 분무 선단과 말기의 분무 plume은 분무 중간에의 분무 plume보다 반경방향으로 더욱 확장되어서 측정점은 상대적으로 분무 가장자리에서 분무 중심축 쪽에 위치하므로 분무 선단과 말기에 큰 액적이 존재한다. 분무 중간에는 급격히 액적 크기가 감소한 후 분무 말기 이후에 다시 증가하여 분무 선단보다 더 큰 값을 알 수 있다.

Fig.8은 분무실(spray chamber)내 가스압력이

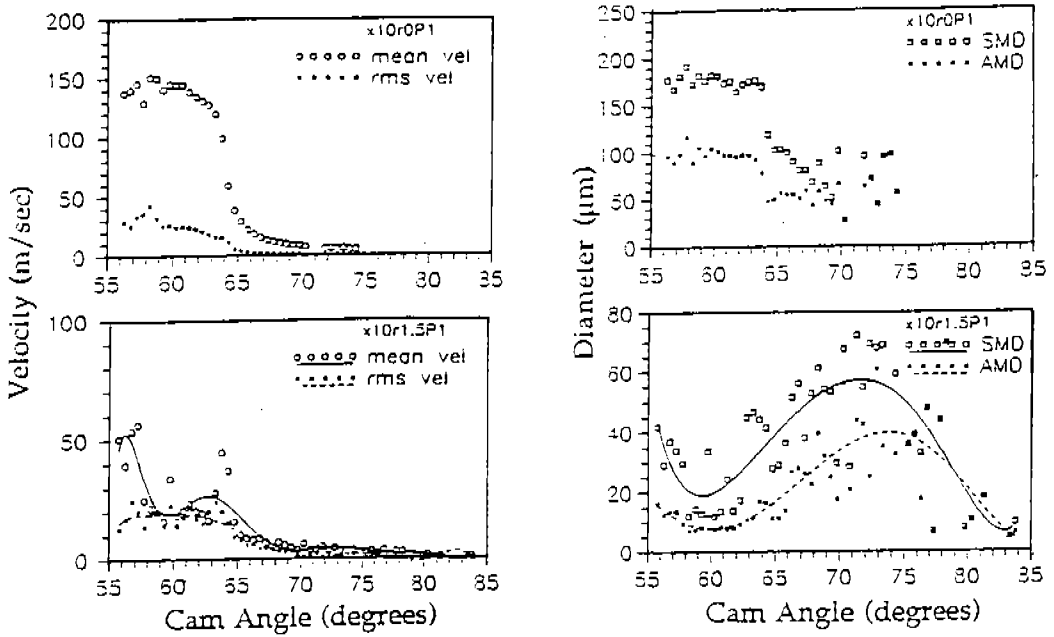


Fig.6 Phase-averaged mean and rms velocities, SMD, and AMD in radial positions at $x=10mm$ and gas pressure of 0.1MPa

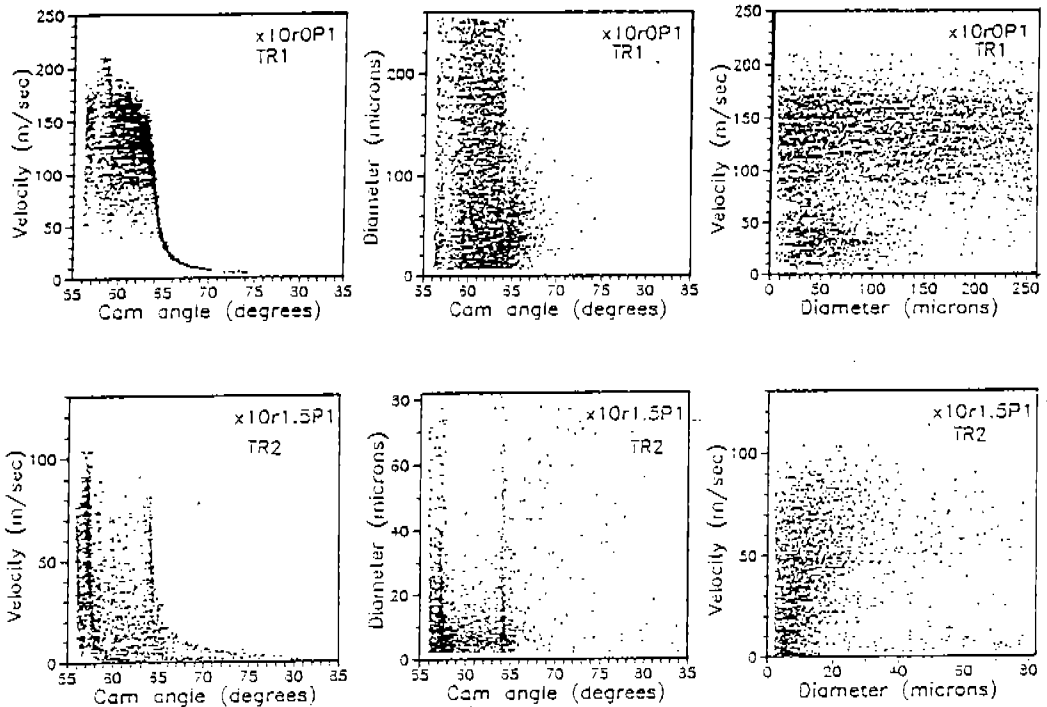


Fig.7 Crank-angle resolved droplet velocity, size and their correlation in radial positions at $x=10mm$ and gas pressure of 0.1MPa

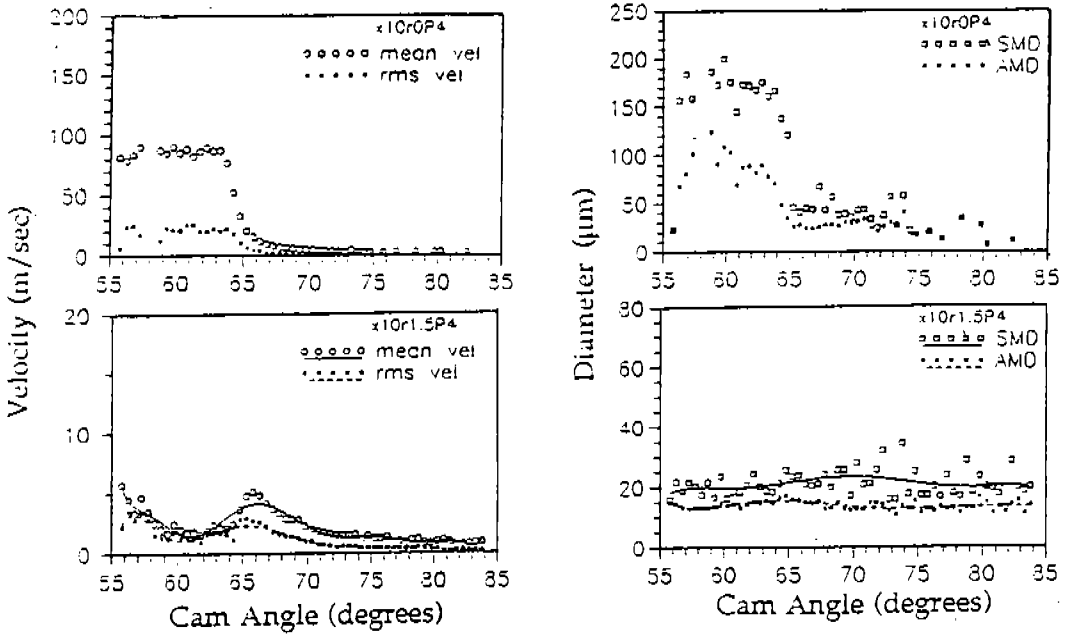


Fig.8 Phase-averaged mean and rms velocities, SMD, and AMD in radial positions at $x=10\text{mm}$ and gas pressure of 2.17MPa

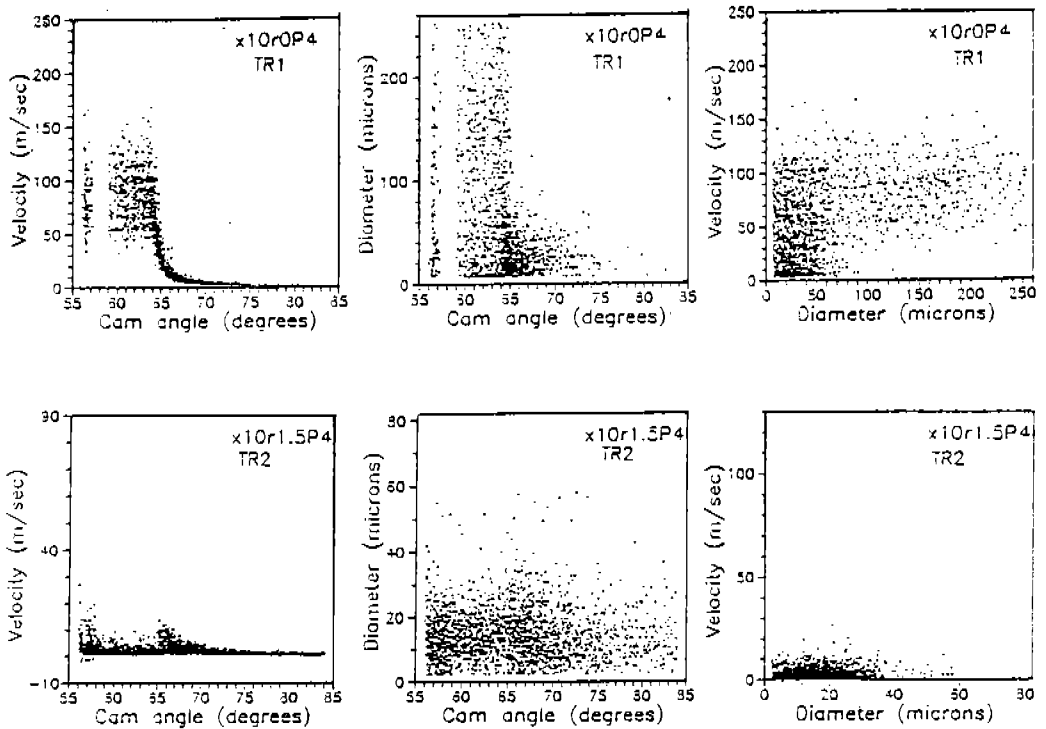


Fig.9 Crank-angle resolved droplet velocity, size and their correlation in radial positions at $x=10\text{mm}$ and gas pressure of 2.17 MPa

2.17MPa($\rho_g/\rho_l=29.2 \times 10^{-3}$)인 것을 제외하고는 Fig.6과 같은 측정점에서 같은 분무 상태를 측정한 것이며 Fig.9는 Fig.8에 나타난 위상평균 data들의 raw data를 나타낸다. 일반적으로 분무 중심축상에서 하류로 측정체적을 이동하면 가스 유속이 감소하여 측정 체적내에 액적이 체류하는 시간이 길어져 분무 액적의 통과 종료 시기가 지연되어 분무 꼬리가 늘어지는 경향이 있지만, 반경 방향에서는 유속이 감소하더라도 이경향이 뚜렷하지 않고 평균 액적 속도의 시간에 대한 변화가 비슷하다. 분무실의 압력이 높을 때에도 노즐근방의 가장자리에서는 Fig.9에서와 같이 파동현상이 계속 나타남을 알 수 있다. Fig.6과 Fig.8에서 보면 rms강도는 밀도비(ρ_g/ρ_l)가 증가하거나 반경방향이 증가할수록 커진다. 예를 들어 측정위치가 $r=1.5\text{mm}$ 인 지점에서 분무실의 압력이 높을 때($P_{\text{gas}}=2.17\text{MPa}$) rms값은 분사후 약 8CA까지는 거의 100%에 달하지만 분무실의 압력이 낮거나($P_{\text{gas}}=0.10\text{MPa}$) 분무중심으로 갈 수록 rms값은 낮아진다. 분무가장자리에서 분무실의 압력이 낮을 때는 SMD는 분무초기에 크다가 감소한 후 다시 커지지만, 분무실 압력이 높을 때 분무의 가장자리($r=1.5\text{mm}$)에서 SMD는 분사시간에 관계없이 거의 $20\mu\text{m}$ 로 거의 일정하다.

Fig.7와 9의 액적 속도 및 크기의 상관관계에서 노즐근방의 분무중심축상($r=0\text{mm}$)에서는 분무실 압력에 관계없이 큰 액적이 빠른 속도를 가짐을 알 수 있는데 이 곳 액적의 모멘텀은 항력보다 큰 이유에 기인한다. 그러나 노즐근방이더라도 분무가장자리($r=1.5\text{mm}$)에서는 분무실 압력이 낮으면 모멘텀이 항력보다 우세하여 큰 액적이 빠른 속도를 나타내지만 분무실 압력이 높아질수록 액적의 크기와 속도의 상관관계는 없어진다.

3.2 확대사진

분무 image는 16mm movie film에 촬영하였으며 사용한 비율은 1/1.9이다. 16mm movie film은 크기가 $16\text{mm} \times 8\text{mm}$ 이므로 대상 물체는 15.2mm 정도를 확대하여 이 광학배율로 확대 사진을 얻을

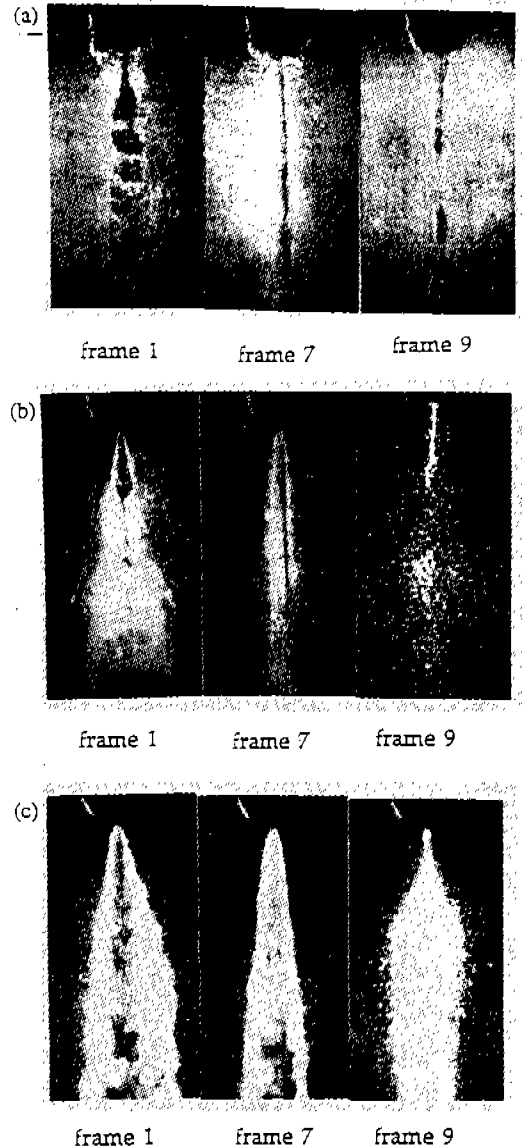


Fig.10 Magnified photographs in the near-nozzle region at (a) 6.6mmHg, (b) 0.10 MPa, (c) 1.34MPa

수 있었으며 실제 확대 사진에 촬영된 노즐 분무는 노즐 선단으로부터 약 12mm 하방까지 포함될 수 있었다. 고속도 사진기의 촬영 속도는 초당 5000 frame 이었기 때문에 1 frame당 시간 간격은 0.2msec이다. Fig.10(a), (b), (c)는 각각 분무실의 압력이 6.6mmHg, 0.1MPa, 1.34MPa 일

때 노즐 근방에서 분무 개시 후 시간이 지남에 따라 분무가 발달하는 과정을 보여주고 있다. 여기서 frame 1은 분무가 관찰된 첫 frame을 뜻하며 frame 7은 7번째 frame을 뜻한다. frame 9은 9번째 frame을 뜻하며 이 때는 분무가 거의 종료되는 시점에 와있다. Fig.10에서 보면 처음에 분사된 분무(frame 1)는 분무실의 가스밀도에 관계없이 모두 다른 때의 분무들(frame 7, 9)보다도 넓게 퍼진다. Fig.10(a)는 분무와 주위 공기와의 상호작용을 없애기 위하여 거의 진공 상태에 분무를 분사한 경우이다. 이 경우에도 처음에 분사된 연료는 노즐 출구 주위에서 퍼지며 미립화 과정이 진행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 이 초기의 노즐근방 분무각의 퍼짐이나 미립화 기간은 아주 짧으며 분사된 연료는 곧바로 폭이 좁은 액주(liquid column)가 되는데, 이 때는 미립화는 크게 위축된 것을 알 수 있고 분무 후기에는 하방부에 표면파(surface wave)의 성장으로 인한 instability가 있어 분열이 됨을 알 수 있다. Fig.10(b), (c)에서는 분무와 공기의 상호작용인 aerodynamic interaction이 있는 경우 이어서 첫 frame(frame 1)의 큰 분무각은 그 다음과정(frame 7, 9)에서 작아지지만 액체 기둥처럼은 되지 않음을 알 수 있다.

노즐근방의 확대사진으로부터 분무각을 측정하여서 Fig.11에 나타내었다. Fig.11에서 보면 분사 직후 노즐근방의 분무각은 감소하기 시작하여 니들이 완전히 열렸을 때는 어떤 일정한 값을 가진다. 모든 경우에 있어서 분무각은 분무실가스 압력이 증가할 수록 커지지만 분무각의 시간에 대한 변화는 거의 비슷한 형태를 가진다. 분무가 종료하는 시기, 즉 니들이 거의 닫히는 시점에서 노즐근방의 분무 발달 과정 역시 분무실 가스 압력에 따라 다르다. 거의 진공상태의 분무말기에서의 분무는 액주가 노즐에 달라붙어 있어서 궁극에는 Rayleigh instability에 의하여 액체기둥이 분열된다. 주위 가스 밀도가 높아짐에 따라 분무 말기에서는 측정된 액적 크기는 작으며 분무는 상당히 열은 상태로 되어 여러 곳으로 퍼진다. 분무실 가스압력이 0.1MPa 일 때에 분무각은 분사말기에 조금 증가하지만 이 경우 확대

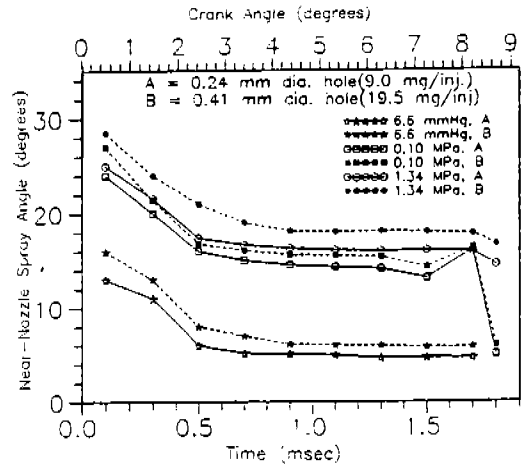


Fig.11 Near-nozzle spray angle determined from microphotographs

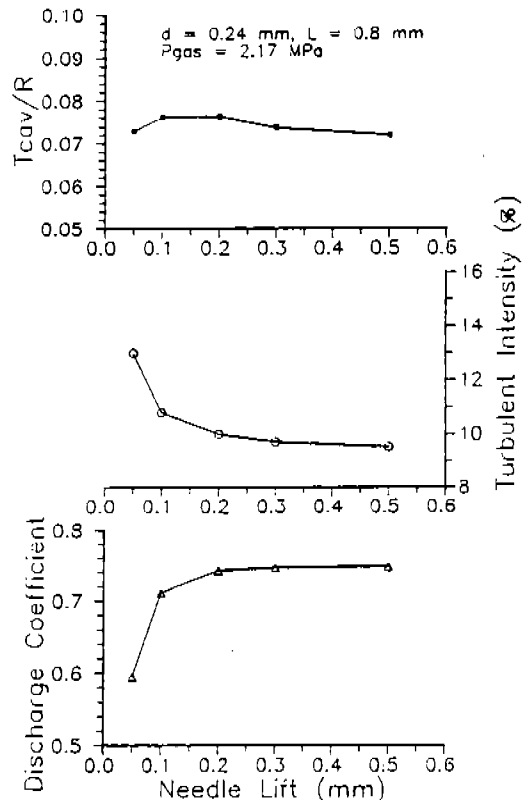


Fig.12 Effect of needle lift on (a) the cavitation thickness, (b) the turbulent intensity, and (c) the discharge coefficient, predicted by single phase flow calculation

사진만으로는 신뢰성이 떨어진다. 그러나 PDPA로 측정된 액적의 크기/속도 data에서도 분사종류 말기에 분무 가장자리에서 파동현상(wave-like behavior)를 보인 것을 상기하면 이 확대사진의 경우와 PADA 데이터가 일치함을 알 수 있다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 분사 개시점에서는 질량 유속과 압력이 증가함에 비하여 분사 말기에는 질량 유량과 압력이 감소하므로 파동현상에서 두번째 정점(peak)은 첫번째 정점보다 그 크기가 약함을 알 수 있다.

3.3 미립화과정

노즐 근방의 확대사진과 PADA로 부터 측정한 액체의 속도 및 크기로 부터 노즐근방에서 비정상 분무특성(현상)을 알 수 있었지만 그 근본 기구(mechanism)는 아직도 뚜렷하지 않다. 분사압력이 클 때 어떻게 하여 노즐내의 액체가 노즐을 나오자마자 작은 액적으로 미립화하는가에 대하여 여러가지 이론이 많다.^(3,7,8) 그중에는 (1) 노즐 내부 유동에서 생성되는 난류의 영향, (2) 난류 내부 유동에서 생성된 반경 방향의 속도성분, (3) 노즐내의 케비테이션(cavitation), (4) 노즐 출구에서의 속도 분포의 재배치, (5) 노즐 출구를 나온 직후의 경계층이 없어짐, (6) 공급 압력의 변동, (7) 연료액체와 주위 가스와의 공기역학적인 상호작용 등을 포함한다. Ruiz⁽⁷⁾는 이 중에서 공기역학적인 상호작용, 노즐 내부의 난류와 케비테이션이 미립화의 주된 이유라 설명한다. 또 Reitz⁽⁸⁾는 위의 여러가지 이론 중에 어느 한 이론만으로는 분무 액체의 미립화를 설명할 수 없고 여러가지 이론이 복합적으로 작용한다고 생각한다.

앞서서 보여진 확대 사진이나 액적 입자의 크기 및 속도 데이터로 부터 공기역학적인 상호작용만이 분무 시작이나 말기의 분무각 증가 및 미립화에 영향을 미치는 것이 아님을 알 수 있었다. 공기역학적인 상호작용이 배제된 거의 진공상태에서의 분무각 증가는 그 원인이 분사 중 변화하는 노즐내부의 유동현상에 있음을 쉽게 알 수 있다. 노즐 내부의 유동현상을 계산한 결과⁽¹⁰⁾가 Fig.12에 나와있으며 분무 초기에 난류강도가 증

가함을 알 수 있으며 이 증가와 초기 분무각 증가가 어떤 관계가 있을 것이다. 또한 니들이 완전히 열리고 난 후, 분무실이 거의 진공상태일 때는 분무각이 감소하지만 분무실 압력이 증가하면 분무각이 증가하는 현상으로부터 공기역학적인 상호작용은 니들이 열린후의 미립화에 주요한 인자임을 알 수가 있다.

케비테이션에 의한 공기방울(cavitation bubble)과 미립화 과정을 바로 연결시킬 수 있는 직접적인 실험은 없지만 노즐 오리피스에 가스를 주입하면 미립화가 촉진된다는 것을 확인하였기 때문에⁽⁹⁾ 케비테이션도 미립화 현상에 밀접한 관계가 있다고 사료된다. 노즐 내부를 단일액상(single-phase)으로 가정하여 압력분포를 구하면 연료의 증기 압력보다 낮아지는 부분이 노즐 입구 부근에서 발견되었는데⁽¹⁰⁾ 이 곳에서는 케비테이션이 발생한다고 생각할 수 있다. 반경방향으로의 케비테이션 두께를 오리피스 반경으로 무차원하여 니들 위치별로 나타낸 것이 Fig.12(a)이며 실제조건에서 연료 노즐 내부에 케비테이션이 있을 수 있음을 암시해 주고 있다.

4. 결 론

시간적으로 변동하는 연료 분무를 주위 gas와 액체 연료의 밀도비를 변화시켜 가면서 분무 액적 크기와 속도를 동시에 측정하고 동일 분무를 확대사진으로 찍어서 노즐 근방에서의 비정상 분무 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 노즐 선단 부근의 분무 가장자리에서 측정 한 속도는 분무실 압력에 관계없이 니들이 열릴 때와 닫힐 때 속도의 정점(peak)을 나타내는 파동현상을 보였다.
- 2) 분무실의 압력이 증가할수록, 분무 가장자리로 갈수록 속도변동 rms값이 증가하였다.
- 3) 액적 크기는 가장자리로 갈수록 작아지는 경향이며, 분무실의 가스 밀도와 연료액체의 밀도비(ρ_g/ρ_l)가 실제 디젤엔진과 비슷한 조건에서 분무가장자리의 액적크기(SMD)는 분무 선단, 중단 말기의 분사시간에 관계없이 약 20 μ m로 거의 일정하였다.

- 4) 노즐 근방에서 확대사진을 찍은 결과 분무가 퍼지는 정도(분무각)는 분사 시작 직후 넓게 퍼졌으며 곧바로 좁아지기 시작하여 총분사시간의 1/3 이후에서는 일정한 값을 나타내었다. 주위 조건에 관계없이 분사 초기에 분무가 넓게 퍼지는 현상이 나타났으며 특히 진공 상태에 가까운 조건에서도 분사 직후 분무각은 크게 나타났다.
- 5) 분무 미립화 과정에서 초기의 미립화에는 공기역학적인 상호작용만이 주요인자가 아니라 노즐 내부의 유동 현상인 난류와 캐비테이션도 중요한 역할을 하며 이들이 완전히 열리고 난후에는 분무 액체와 주위 공기와의 공기역학적인 상호작용이 중요하다.

참 고 문 헌

1. H. Hiroyasu and T. Kadota, "Fuel Droplet Distribution in Diesel Combustion Chamber", SAE paper 740715, 1974.
2. K.-J. Wu, R.D. Reitz, and F.V. Bracco, "Measurement of Drop Size at the Spray Edge Near Nozzle in Atomizing Liquid Jets", Phys. Fluids, Vol.29, No.4, pp.941-951, 1986.
3. F.V. Bracco, "Modelling of Engine Sprays", "SAE paper 850394, 1985.
4. T. Kakegawa, T. Suzuki, K. Tsujimura, and M. Shimoda, "A Study on Combustion of High Pressure Fuel Injection for Direct Injection Diesel Engine", SAE paper 880422, 1988.
5. A.A. Amsden, P.J. O'Rourke, and T.D. Butler, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MS, 1989.
6. G.E. Cossali, G. Brunello, and A. Coghe, "LDV Characterization of Air Entrainment in Transient Diesel Sprays", SAE paper 910178, 1991.
7. F. Ruiz and N. Chigier, "The Mechanics of High Speed Atomization", ICLASS-85, VIB/3/, London, 1985.
8. R.D. Reitz, "Atomization and Other Break up Regions of a Liquid Jets", Princeton University, Department of Aerospace Engineering Ph.D. Thesis, 1375-T, 1978.
9. X.F. Wang, J.S. Chin, and A.H. Lefebvre, "Influence of Gas-Injector Geometry on Atomization Performance of Aerated-liquid Nozzles", International Journal of Turbo and Jet Engine, Vol.6, pp.271-291, 1989.
10. J.Y. Koo, "Characteristics of a Transient Diesel Fuel Spray", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1991.