

〈논 문〉 SAE NO. 97370056

가솔린 엔진용 분사노즐의 간헐적인 분무특성

Intermittent Spray Characteristics of the Injection Nozzle for a Gasoline Engine

김 원 태*, 오 제 하*, 강 신 재**, 노 병 준**
W. T. Kim, J. H. Oh, S. J. Kang, B. J. Rho

ABSTRACT

Spray characteristics of a fuel injector have an important effect upon engine power and emission. Thus this study was investigated the spray characteristics of the intermittent injection using a gasoline fuel injector. Image processing system and PDA system were utilized for visualization of a spray behavior and measurements of a droplet size and velocity, respectively. Fuel injection duration was fixed with 3ms and injection pressure was varied such as 250kPa, 300kPa, 350kPa. For a high fuel injection pressure, spray tip arrival time was fluctuated at a vigorously disintegrated cross section. Axial velocity was linear correlated with fuel droplet size in the time interval of an injected main spray at spray downstream.

주요기술용어 : Spray Characteristic(분무 특성), Intermittent Injection(간헐 분사), Spray Tip Arrival Time(분무선단 도달시간), Main Spray(주분무)

1. 서 론

오늘날 엔진설계는 엔진 성능을 좌우하는 엔진 구성 요소중 가장 중요한 역할을 차지하는 연료 공급계 개선과, 국제적인 공통과제인 환경문제로 인한 세계 각국들의 자동차 배기규제에 대응하는 쪽으로 이루어지고 있다. 이들 요인들을 충족시

키기 위해 연료분사를 전자적으로 제어하여 초회박 상태에서 연소시킴으로써 엔진성능 및 연비향상과 배기가스 저감을 얻고자 하고 있다. 가솔린 엔진의 전자제어 연료분사 시스템의 대표적인 형태인 MPI(Multi-Point Injection)시스템은 흡기 포트 내로 연료를 직접분사하므로 연료와 공기의 혼합시간이 짧기 때문에 연료분사기의 시간적, 공간적 분무특성이 연소에 매우 큰 영향을 끼친다. 가솔린 연료분사기의 분무특성에 대한 연구로 Safman 등¹⁾은 레이저 계측기인 PDA(Phase

* 정회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

** 정회원, 전북대학교 기계공학과

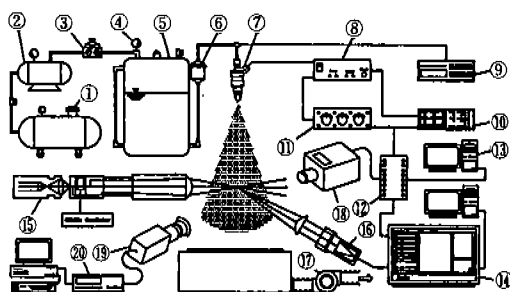
Doppler Anemometry) 시스템을 이용하여 가솔린과 디젤연료 분사 시스템에 적용 가능성을 평가하였고, Pitcher와 Wigley²⁾는 PDA 시스템을 사용하여 실제 엔진조건에서 자동차 연료분사과정을 연구하기 위하여 개발된 기술을 소개하였다. 또한, Kobashi 등³⁾과 Dementhon 등⁴⁾은 간헐적인 분무의 유동가시화와 더불어 PDA 계측을 수행하였으며, Jawad 등⁵⁾은 디젤분사기의 간헐적인 분무특성을 고찰하기도 하였다. Tsukamoto 등⁶⁾은 본 실험에 사용된 것과 유사한 핀틀형 가솔린 분사기의 분무특성을 사진분석을 통하여 고찰하였으나, 분무의 거시적인 거동에 국한하였다. 그러나, 이들 연구들은 간헐적인 가솔린 분무의 특성을 명확하게 고찰하지는 못하였다. 따라서, 본 연구는 가솔린 연료분사기의 분무거동을 가시화하고, 이를 근거로하여 광학적 계측기법으로 널리 사용되어지고 있는 PDA 시스템을 이용하여 각 측정점에서 액적의 크기와 속도를 동시에 계측하여 간헐적인 분무특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 가솔린 연료분사기는 핀틀형 분사기를 사용하였다. 핀틀형 연료분사기는 노즐 직경이 0.923mm의 중심에 직경이 0.789mm의 핀틀이 위치하며 핀틀 선단부의 확산각은 33°이다. 가솔린 연료분사기의 간헐적인 분무거동의 가시화와 PDA 측정을 위하여 Fig.1 같은 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 연료공급부, 가시화 장치부 및 PDA 측정부, 데이터 처리부로 이루어져 있다.

연료공급부는 연료분사기에 일정한 압력의 연료를 공급하기 위하여 왕복식 압축기로 가압된 공기를 충전용기에서 압력맥동을 소거하고, 압력 레귤레이터를 통과시켜 연료탱크내로 일정하게 가압하였다. 가압된 일정 압력의 연료는 연료필터를 통과하여 연료속의 미세한 입자들을 제거하고 연료분사기에 공급하였다. 연료분사기에 공급되는 연료분사압을 계측하기 위하여 연료분사기의 노즐 선단부에서 10cm 상류에 정압관을 인출



- | | | |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1. Air Compressor | 8. Fuel Injector Control Unit | 15. Ar-ion Laser |
| 2. Surge Tank | 9. Digital Pressure Indicator | 16. Photo-Detector |
| 3. Pressure Regulator | 10. Oscilloscope | 17. Suction Blower |
| 4. Pressure Gauge | 11. Amplifier | 18. Stroboscope |
| 5. Fuel tank | 12. A/D Converter | 19. CCD-Camera |
| 6. Fuel Filler | 13. Computer | 20. Video Tape Recorder |
| 7. Injector | 14. PDA Signal Processor | |

Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Set-Up

하여 압력센서(Druck, PDCR 910)와 연결하고 검출된 압력을 디지털 압력변환기(Druck, DPI 420)로 계측하였다. 연료분사기의 솔레노이드 밸브를 개폐하기 위하여 연료분사조절장치를 컴퓨터와 인터페이스하고 분사시기와 기간을 조절할 수 있도록 하였다.

가시화된 분무거동은 스트로보스코프(Stroboscope)의 발광기간을 연료분사기의 분사시간에 지연을 주어연고, 지연기간은 컴퓨터로 조절하였다. CCD 카메라로 간헐 분무거동 영상을 잡아 VCR을 통하여 기록하여 분석하였다.

PDA 측정부는 레이저 발진부와 광학계로 구성되어 있다. 광원으로 이용된 레이저 발진부는 공냉식 Ai-ion 레이저(750mW, DANTEC)를 사용하였다. 광학계는 송광부와 수광부로 구성되어 있으며, 송광부는 광학적인 주파수 편이를 이용하여 유동속도의 방향성 계측이 가능하도록 브라그셀(Bragg Cell)을 설치하였고, 수광부는 분무입자의 굴절산란광을 검출하여 전기적인 신호로 변환시키는 광검출기(Photo Detector)를 가지고 있다. 레이저 빔은 광섬유를 통하여 송광부에 전송되어지고 송광부와 수광부는 고정 벤치에 견고하게 빔의 진행방향에 대하여 60°의 각을 유지하게 설치하였다. 연료분사기는 3차원 이송장치

를 사용하여 측정위치로 컴퓨터 제어를 통하여 정확하게 이송하였다.

데이터 처리부는 PDA에서 나오는 신호를 처리하는 신호처리기(Signal Processor)와 온라인 화하여 486PC를 사용하여 분석하였다. 신호처리기(DANTEC, 58N10)는 버스트(Burst) 검출방식을 이용하였으며, 연료액적의 크기와 속도는 각각 도플러 신호의 상대적 위상차와 주파수 크기에 의하여 계산된다.

2.2 측정방법

가솔린 연료 분사기의 간헐적 분무를 측정하기 위하여 연료 분사기의 출구를 좌표계의 원점으로 하고 분무 축 하방향을 Z축, 반경방향을 X축으로 설정하여 2차원 측정을 수행하였다. 연료 분사압력의 변화가 분무특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 250kPa, 300kPa, 350kPa로 연료 분사압력을 일정하게 변화시켰다. 이때의 압력변동은 0.06~0.08% 범위를 유지하였다. 분무 측정위치는 분무 축방향(Z)으로 10~70mm까지 10mm간격으로 각 분무 축 단면에서 반경방향(X)으로 2mm씩 연료분사기를 이송하여 분무의 광까지 측정하였다. 연료 분사기에 공급되는 연료는 밀도 $\rho = 0.755\text{g/cm}^3$, 굴절율 1.435인 무연 가솔린을 사용하였다. 분무의 거시적인 고찰을 위한 분무거동 가시화는 발광시간이 30 μs 인 스트로보스코프의 지연시간을 변화시켜 가며 분무선단 변화를 측정하였다. 분무특성을 정량적으로 분석하기 위하여 사용된 PDA 시스템은 연료분

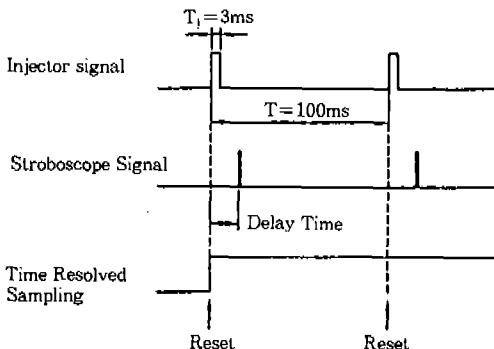


Fig.2 Input Logic Signals

사기에 공급되는 분사펄스와 동일한 시간에 리셋(Reset) 신호를 분사주기마다 반복하여 시간분해(Time Resolved) 방식으로 한 측정점에서 10,000여개의 데이터를 측정하여 처리하였다. 가솔린 연료분사기의 분사기간은 3ms 고정하였다. 이때 각 분사압력에 따른 연료 분사량은 10.935g/min, 11.939g/min, 12.908g/min이었다. Fig.2에 연료분사기, 스트로보스코프, PDA의 입력신호 펄스를 보이고 있다. 실험이 이루어지는 동안 주위공기의 온도는 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무거동 가시화

Fig.3은 연료 분사압력이 각각 250kPa과 350kPa에 대하여 스트로보스코프의 발광시기를 분사기간에 지연을 주므로써 얻어지는 분무선단의 정지형상을 일반 카메라의 1/8의 셔터속도로 ASA400의 흑백필름으로 촬영한 것이다. 분사펄스 트리거 신호를 받은 연료분사기는 솔레노이드 밸브의 관성력과 연료분사기의 기하학적 형상으로 인하여 실제로 분무선단이 확인되는 시간은 약 1.5ms 정도의 지연이 발생하고 있다. 연료분사기 출구로부터 분출되는 연료는 핀들의 영향으로 액막의 형태를 유지하며 횡단면이 링(Ring) 형태를 하고 있다. 분무 초기에는 연료가 정지대기로 분출되면서 노즐 출구로부터 확산과 정지대기의 항력으로 인하여 분무선단이 넓게 유지되고, 액막에 파형(Wave)이 형성되면서 액적으로 분열이 이루어진다. 분사말기인 4.5ms 영역에 접어들면서 니들밸브가 닫히고 연료분사기로부터 분출되는 연료량이 급격히 감소하면서 핀들의 영향으로 저 속의 액막이 형성된다. 시간이 경과함에 따라 분무상류 영역에서 액막의 표면장력의 영향으로 인하여 연료액막으로 둘러싸인 버블(Bubble)이 형성되고 있다. Dementhon⁴⁾의 간헐분무 가시화 경험과 유사하게 나타나고 있으나, 본 실험의 경우는 액막으로 둘러싸인 길이가 짧게 나타나고 있다. 이는 연료의 특성과 연료분사압력 차이때문이라 생각된다. 분사시간이 경과

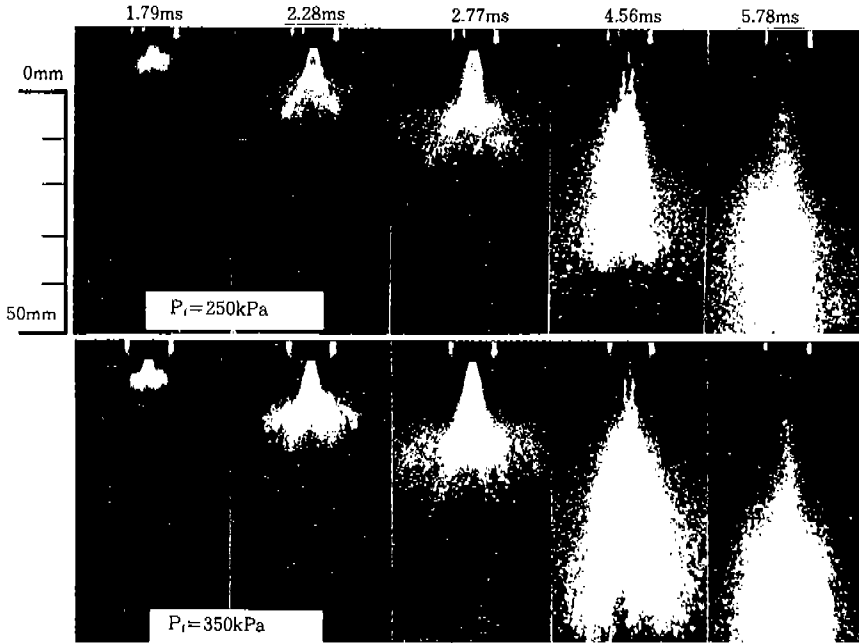


Fig.3 Photographs of Spray Behavior

함에 따라 액막으로 둘러싸인 버블의 하단에 분열이 발생하고 버블이 점점 작아져 분사시간이 4.9ms를 지나면 액막의 버블은 연료액적으로 분열되어 사라진다. 압력이 증가함에 따라 분무선단길이의 진행속도는 증가하고 있으며 분무 초기, 분사기 노즐 출구로부터 확산과 정지대기의 항력으로 나타나는 분무폭의 증가가 더욱 크게 나타나고 있다. 또한, 연료 분사압력이 클수록 액막으로 형성되는 버블의 길이는 작게 나타나며 분열은 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

3.2 분무 선단폭 및 도달시간

영상처리 자료를 이용하여 시간변화에 따른 분무선단 폭 및 길이 변화를 고찰하기 위하여 Fig. 4에 분무선단의 반폭(B)을 분무진행거리(H)로 나누어 도시하였다. 압력이 증가할수록 분무선단 폭의 확산 정도가 커서 B/H는 크게 나타나고 있다. 분무초기에 분사된 분무가 큰 운동량을 가지고 분무선단이 빠르게 진행하는 반면에 분무선단폭의 증가는 둔화되어 분사시간이 경과함에 따라 B/H는 급격한 감소를 보이고 있다. 분사기의 핀틀이 닫힌 이후, 분무선단 폭의 변화가 거의

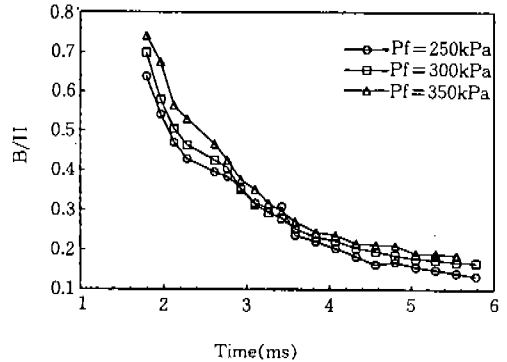


Fig.4 Variation of Spray Tip with Lapse Time

일정하게 되고 분무선단 진행속도가 감소함으로써 B/H는 대략 0.15 값에 근접하고 있다.

Fig.5는 PDA 측정 테이터로부터 각 측정 위치별로 분무선단이 도달한 시간을 고려하여 축방향 위치에 따른 반경방향 분포를 도시한 것이다. 축방향 위치 Z=10mm 영역에서는 분사압력의 증가에 관계없이 반경방향 분포가 일정한 도달시간을 보이고 있다. 이는 분무선단의 반경방향 도달시간 변화가 크지않고, 분무상류 영역이기 때

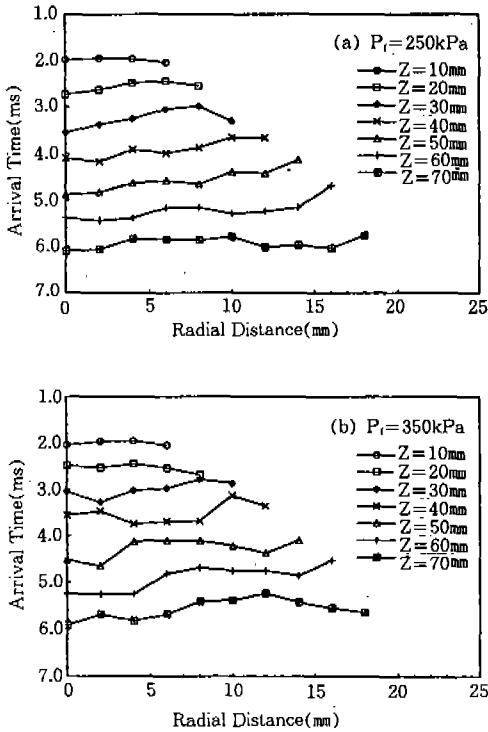


Fig.5 Distribution of Spray Tip Arrival Time

분에 연료액적이 밀집되어 있기때문이라 생각된다. 그러나, $Z = 30 \sim 50\text{mm}$ 영역에서 반경방향 도달시간은 분사압력이 큰 경우 변동치는 증가를 보이고 있다. 이로부터 이 위치에서는 분사압력 증가에 따른 확산폭의 증가와 더불어 분무선단의 반경방향분포가 불균일한 형태로 액적 분열이 활발하게 일어남을 알 수 있다.

3.3 액적의 속도

Fig.6은 연료분사압력 350kPa의 경우, 축방향 위치 $Z = 10\text{mm}$, 70mm 의 분무 중심에서 액적들의 축방향속도(u)와 반경방향속도(v)를 시간 변화에 따라 도시한 것이다. 축방향 속도는 분무 하류로 갈수록 최대 속도가 감소하고 있으며, 분무상류에서는 분무선단이 지나간 이후 주 분무의 액적속도가 거의 일정한 분포를 보이며 분무말기에 급격히 감소하고 있다. 그러나, 분무 하류에서는 분무선단이 통과한 이후에 점진적으로 액적의 속도가 감소하고 있다. 분무 상류의 분사말기에는 작은 속도의 액적들이 나타나고 있으며, 분무 하류에서는 운동량의 감소에 의하여 5m/s 이

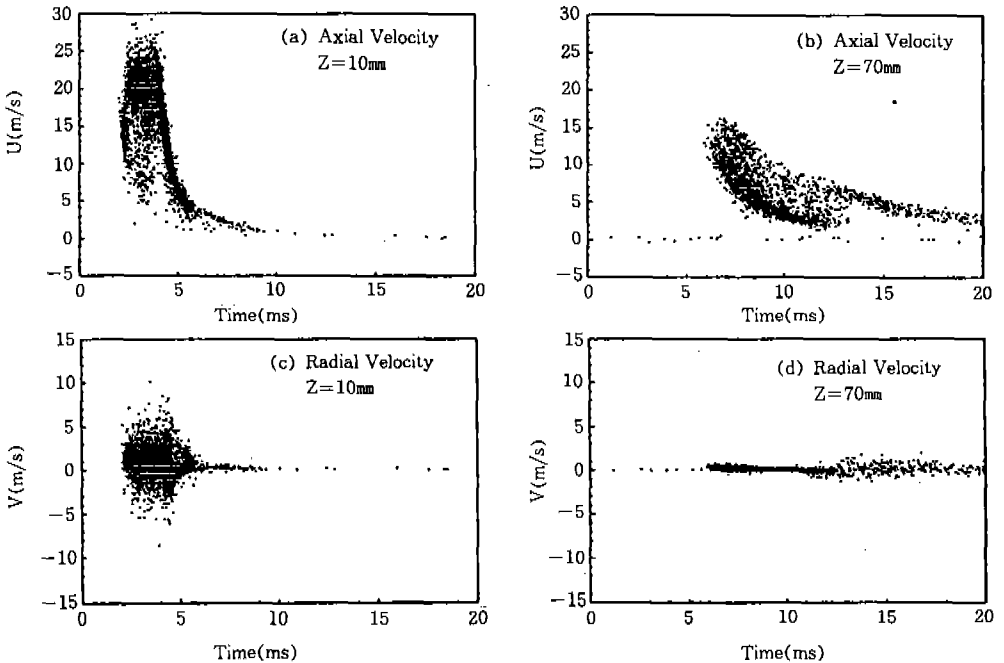


Fig.6 Variation of Droplet Velocity with Lapse Time

하의 작은 속도의 액적들이 존재하고, 전 시간영역에 걸쳐 아주 작은 축방향속도를 갖는 부유하는 액적들이 계속되고 있다. 분무선단 도달시간 이전에 부유하는 액적들이 나타나는 것은 전에 분사된 액적들이 분무 하방향으로 이동함에 따라 점진적으로 운동량을 잃고 부유하면서 액적들의 증발이 이루어지기 때문으로 생각된다.

분무 중심영역에서 반경방향속도에 양과 음의 액적속도가 존재함을 알 수 있다. 분무 상류에서는 반경방향 속도의 크기가 큰 액적들이 다수 존재하나 분무하류로 갈수록 반경방향 속도는 1.5m/s 이하의 작은 속도분포를 보이고 있다. 이는 분무 가시화 사진에서도 확인할 수 있듯이 분무초기에 분사기 출구로부터 분출된 분무가 큰 운동량을 가지고 확산하기 때문으로 고려되어진다.

이러한 유동특성을 명확하게 하기 위하여 주분무 유동영역에 대하여 축방향 평균속도와 반경방향 평균속도를 반경방향에 따라 Fig.7에 도시하

였다. 축방향 거리가 증가함에 따라 최대 축방향속도는 감소하고 있으며, 최대 축방향속도가 나타나는 반경방향 위치가 분무 외곽쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 분무상류인 Z=10mm의 반경방향속도는 반경방향거리에 따라 급속한 증가를 보이고 있으며, 분사압력이 증가할수록 크게 나타나고 있다. 이는 분무거동의 가시화 사진에서 본 분무각의 증가가 분사기의 출구로부터 정지 대기로 분사되면서 항력으로 인한 반경방향의 급격한 확산을 확인할 수 있다. 또한, 축방향 거리가 증가함에 따라 분무 가시화 사진에서 보인 분무선단 폭의 변화가 거의 일정하므로 반경방향의 속도가 감소함을 알 수 있다.

3.4 분무 액적의 크기 분포

Fig.8은 시간변화에 따른 액적크기분포를 분무 중심 위치의 분무 상류영역인 축방향 위치 Z=10mm에서 연료 분사압력 250kPa과 350kPa

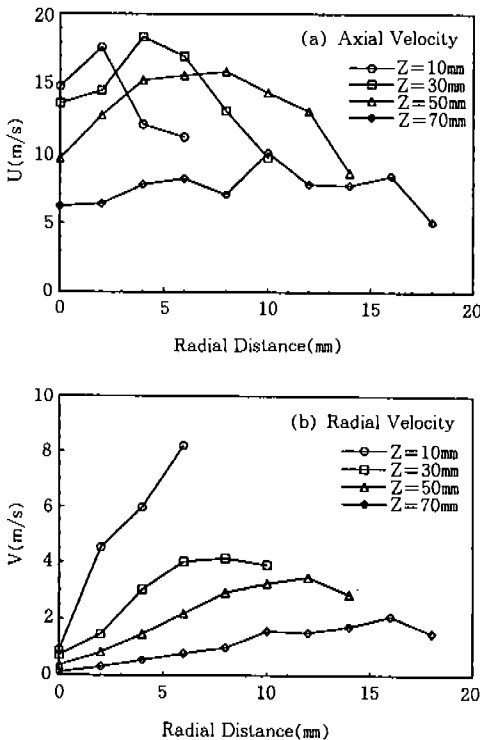


Fig.7 Distribution of Mean Velocity

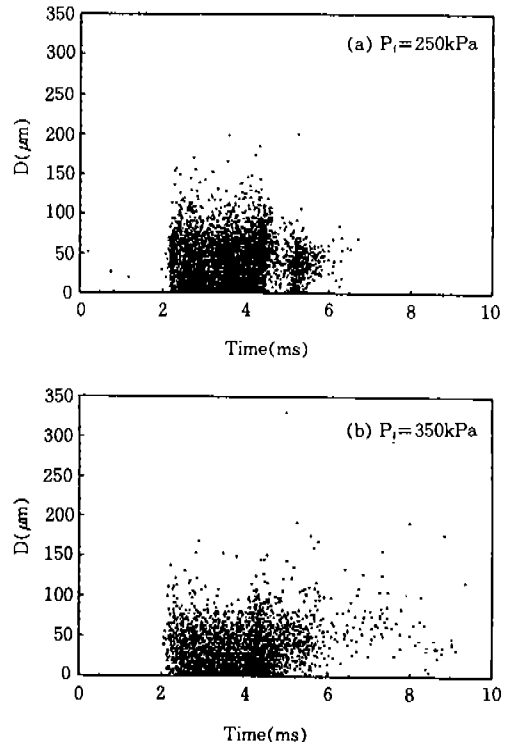


Fig.8 Variation of Droplet Size with Lapse Time

에 대하여 보이고 있다. 분사압력 250kPa의 경우, 가시화 사진의 분사말기에 분무 상류영역에서 보이는 액막으로 둘러싸인 버블이 존재하는 시간영역인 대략 4.5ms~4.9ms 영역에서는 액적으로 분열이 거의 이루어지지 않기 때문에 액적 밀도가 적고, 이 시간 영역을 지나면 액막으로

둘러싸인 버블이 분열되면서 액적이 다시 집중적으로 분포되고 있다. 분사압력이 증가함에 따라 가시화 사진에서 알 수 있듯이 액막으로 둘러싸인 버블의 길이가 짧게 형성되어, Z=10mm인 측정 위치에서 분열이 일어나므로 연료분사압력 350kPa의 경우는 큰 액적들이 다수 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 분사압력 변화에 따라 축방향 위치 Z=70mm인 분무 하류영역에서의 수확률 밀도분포를 보이고 있다. 수확률밀도분포는 측정된 액적의 전체수에 대한 특정 액적크기구간에서의 측정 빈도수의 비율로 다시 그 액적구간을 나누어 나타낸 것이다. 여기서 액적의 크기구간은 20 μ m로 하였다. 본 연구에서 사용된 대수정규분포(Log-Normal Distribution)는 다음 식⁷⁾에 의해 계산하였다.

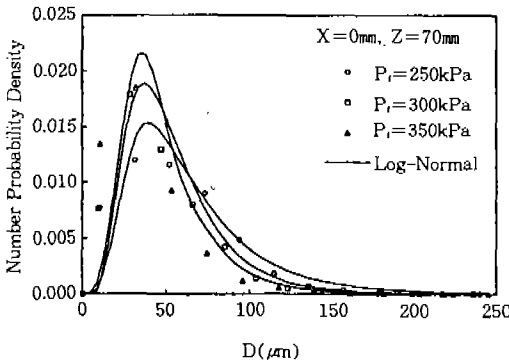


Fig.9 Number probability Density Distribution

$$f(D) = \frac{1}{D \cdot S_G \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln D_{GM})^2}{2S_G^2}\right] \tag{1}$$

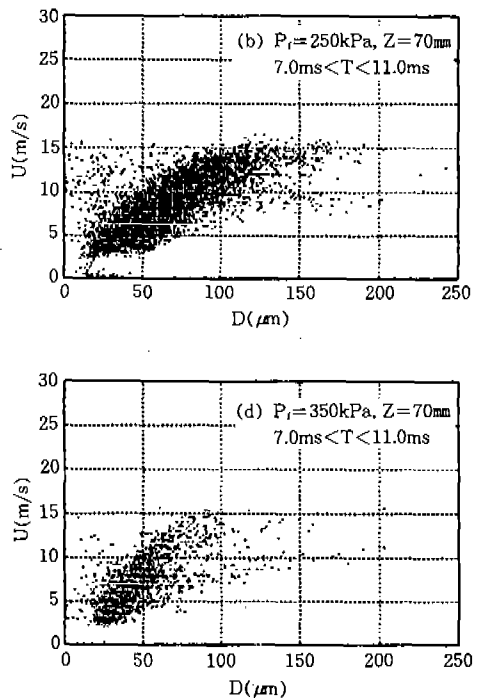
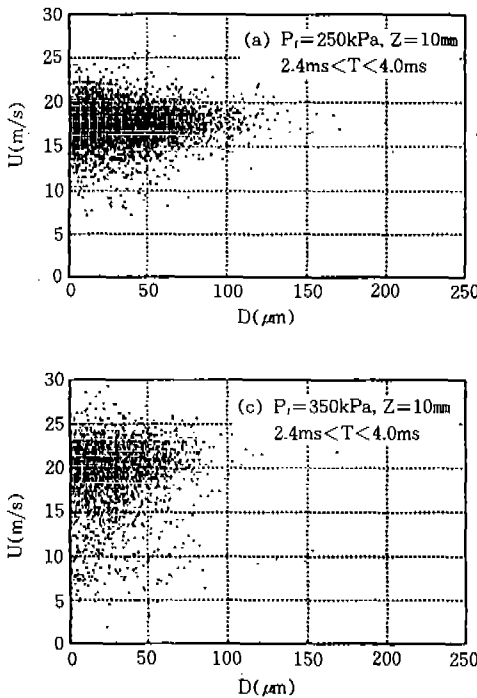


Fig.10 Correlation Between Droplet Size and Axial Velocity

여기서, D_{DG} 는 기하학적평균직경이고, S_G 는 기하학적 표준편차이다.

분무하류인 $Z=70\text{mm}$ 위치에서는 각 분사압력에 있어 액적이 큰 영역에서는 대수정규분포에 접근하는 경향을 보이고 있다. 분사압력이 증가할수록 큰 액적들의 빈도수는 작아지고 작은 액적들의 빈도수가 증가하고 있다. 이는 분사압력이 증가할수록 미세한 액적으로 분열이 촉진되기 때문이다. 분무하류인 $Z=70\text{mm}$ 에서는 대략 $40\mu\text{m}$ 의 액적들이 많이 나타나고 있으며, 분사압력이 증가할수록 빈도수는 증가하고 있다.

3.5 액적의 크기와 속도 상관관계

Fig.10은 분무 중심축에서 축방향속도와 액적 크기의 상관관계를 주분무 기간동안에 위치에 따른 분포 경향을 고찰하기 위하여 도시한 것이다. 분무 상류인 $Z=10\text{mm}$ 에서는 분무선단 도달영역에서 분열이 일어나는 분무선단이 도달함에 따라 액적크기에 관계없이 일정한 크기의 속도를 보이고 있다. 연료 분사압력이 증가할수록 분열이 활발하게 일어나므로 보다 넓은 속도 영역을 가지고 있다. 따라서, 이 위치는 분사압력으로 인한 운동량이 지배적인 분사초기 영역으로 고려되어 질 수 있다. 그러나 분무 하류인 $Z=70\text{mm}$ 영역에서는 분열이 완료된 주분무가 진행되는 시간동안에 큰 액적들이 관성력의 영향으로 큰 운동량을 갖게되어 속도가 크게 나타나고 있다. 즉, 주분무 영역에서 액적의 크기와 속도는 선형적인 상관성을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 연료 분사 압력의 증가와 무관하게 액적속도와 크기는 분무 하류영역에서 선형적인 상관성을 유지하고 있다.

4. 결 론

간헐적으로 분사되는 핀틀형 가솔린 연료분사기의 분무특성을 고찰하기 위하여 영상처리에 의한 가시화와 액적의 속도와 크기를 동시에 계측하는 PDA 측정으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분사말기에 형성되는 액막으로 둘러싸인 버블은 연료분사압이 증가할수록 작게 유지되었다.

- 2) 분사압력이 클수록 분무도달시간의 반경방향분포는 분열이 활발히 일어나는 단면인 $Z=30\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 에서 불규칙하게 나타났다.
- 3) 간헐분무의 주분사 영역에서의 액적크기분포는 Log-Normal 분포에 근접하였으며, 연료분사압력이 클수록 수확률분포는 $40\mu\text{m}$ 의 작은 액적의 빈도수가 증가하였다.
- 4) 주분무가 도달하는 시간 동안에 분무하류영역($Z=70\text{mm}$)의 분무중심에서 분무 축방향속도와 액적크기는 선형적인 상관관계를 보였다.

후 기

본 연구는 전북대학교 자동차 신기술 연구소의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다. (연구과제번호 : AR95-16)

참 고 문 헌

1. M. Safman, G. K. Fraidl and G. Wigley, "Application of Phase and Laser Doppler Anemometry to the Measurement of Droplet Size and Velocity in Gasoline and Diesel Fuel Injection Systems", 4th International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, pp. 1~6, 1988.
2. G. Pitcher and G. Wigley, "Laser and Phase Doppler Anemometry Measurement Techniques for Automotive Fuel Sprays", 3rd International Conference Laser Anemometer-Advances and Applications, pp. 441~454, Swansea Wales, 1989.
3. K. Kobashi, K. Hishida and M. Maeda, "Measurement of Fuel Injector Spray Flow of I. C. Engine by FFT Based Phase Doppler Anemometer-An Approach to the Time Series Measurement of Size and Velocity", The 5th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, pp. 268~287, Lisbon, 1990.

4. J. B. Dementhon, F. Vannobel, "Phase Doppler Anemometry in Gasoline Sprays : In Atmosphere and in a Steady Flow Rig", Proc. Conference ILASS-Europe, pp. 48~53, Guildford, 1991.
5. B. Jawad, E. Gulari and N. A. Henein, "Characteristics of Intermittent Fuel Sprays", Comustion and Flame 88, pp. 384~396, 1992.
6. Tokihiro Tsukamoto, Teruo Wakashiro, Masashi Yamaguchi, Jiro Senda and Hajime Fujimoto, "Characteristics of Spray Injected from Gasoline Injector(1st Report, Macroscopic Behavior of Spray)", JSME Series B, Vol. 58, No. 547(1992-3), Paper No. 91-045B, 1992.
7. 강신재, 최진철, 오제하, 노병준, "액막형 동축분무의 액적크기 분포함수에 관한 연구", 한국항공우주학회지 Vol. 23, No. 1, pp. 45~52, 1995.