

간헐적으로 분사되는 핀틀형 가솔린 분사기의 액적크기와 속도 상관관계에 관한 연구

A Study on the Correlation of Droplets Size and Velocity
of the Pintle Type Gasoline Injector with Intermittent Injection

강 신 재*, 김 원 태**

S. J. Kang, W. T. Kim

ABSTRACT

The correlation between the droplets size and the velocity are investigated for an intermittent spray of the pintle type fuel injector employed in a port injection gasoline engine. The analysis such as the mean droplet size, SMD, and velocity under the fixed injection period and varied fuel pressures are conducted utilizing PDPA systems. As results, the experimental data obtained, show that the larger droplet sizes, the higher velocities during the spray tip arrival time, and that at $Z=70\text{mm}$, $r=8\text{mm}$, both droplet sizes and velocities are peak. At the upstream, flow of droplets are dominated by injection pressure, which are more effected inertia force of droplets at the downstream of $Z=70\text{mm}$.

주요기술용어 : Intermittent Spray(간헐 분무), Pintle Type Fuel Injector(핀틀형 연료분사기), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer), SMD(Sauter Mean Diameter), Main Spray Region(주분무 영역)

1. 서 론

가솔린 기관의 전자제어식 연료분사 시스템은 엔진의 운전상태를 각종 센서(sensor)에 의해 검출하여 ECU(Electronic Control Unit)로 보내어 포트 내로 분사되는 연료량을 분사기에 공급되는 펄스 신호의 길이를 조절함으로써 엔진의 출력 향상 및 배기 특성을 제어한다. 이와 같은 왕복동형 기관에서는 사이클마다 분사기에 분사펄스가 주기적으로 주어지기 때문에 간헐적인 분무가 형성된다. 간헐적인 분무특성은 연소에 중요한 인자로 작용되어지므로 연소

해석에서 반드시 고려되어야 한다. 이러한 분무 특성을 좌우하는 액적들의 크기 및 유동 특성에 관한 연구들은 광학적인 계측 장비인 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템이 보급되면서 활발히 연구되어지고 있다.^(1~9) Koo와 Martin⁽⁵⁾은 측정위치, 크랭크각, 연료분사량, 분사펌프 회전수 변화 조건에서 간헐적으로 분사되는 디젤 분무의 액적크기와 속도를 PDPA 시스템을 이용하여 동시에 계측하여 분석하였다. 또한, Tokuota 등⁽⁸⁾과 Zhang 등⁽⁹⁾은 선회 무화기의 분무구조를 고찰하기 위하여 분사압력에 따라 발생하는 선회분무의 액적크

* 정회원, 전북대학교 기계공학부

**전북대학교 정밀기계공학과 대학원

기와 속도를 동시에 측정하고, 이를 이용하여 4개의 액적크기분포로 나눈 액적크기 부류에 따른 속도분포 특성을 고찰하였다.

따라서, 본 연구에서는 포트 분사식 가솔린 기관에서 사용되고 있는 핀틀형 연료분사기를 사용하여 간헐적으로 분사되는 분무 액적들의 유동 및 크기분포를 연료의 분사압력에 따라 실험적으로 고찰하여 시간변화 및 측정위치에 따른 액적크기와 속도의 상호관계와 액적크기별 유동분포를 분석하고자 한다. 그러므로서 간헐적인 가솔린 연료분무의 해석적 연구를 수행하는 데 필요한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

본 연구를 위해 구성된 실험장치는 Fig. 1 과 같이 연료분사기, 연료공급부, PDPA 시스템으로 구성하였다. 연료분사기는 Fig. 2와 같은 노즐부 형상을 갖는 핀틀 형상으로 솔레노이드 밸브에 가해지는 펄스신호에 따라 분사가 이루어진다. 연료공급부는 공기 압축기에 의해 가압된 공기를 완충용 용기에서 공기 압축기에 의한 공기 맥동을 제거한 후, 일정한 압력으로

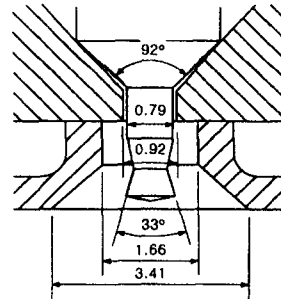


Fig. 2 Detail of nozzle part in pintle type fuel injector

설정된 압력 조절기를 거쳐 연료탱크에 채워진 연료를 가압한다. 가압된 일정한 압력의 연료는 연료필터를 통과하여 연료 속에 존재하는 불순물을 제거한 후 연료분사기에 공급된다. 공급되는 연료 압력은 연료분사기의 입구에서 정압관을 인출하여 압력센서(Druck, PDCR 910)로 검출하여 압력변환기(Druck, DIP 420)로 관측함으로써 항상 일정한 연료압이 유지 되도록 하였다. 연료 분사기간 및 주기는 연료 분사 조절장치를 컴퓨터와 인터페이스 하여 컴퓨터에 설정치를 입력하였다. 연료분사기로부터 분사되는 연료분무의 액적크기와 속도를 동시에 측정하기 위하여 사용된 PDPA 측정장치는 광원으로 사용된 공랭식 Ar-ion 레이저

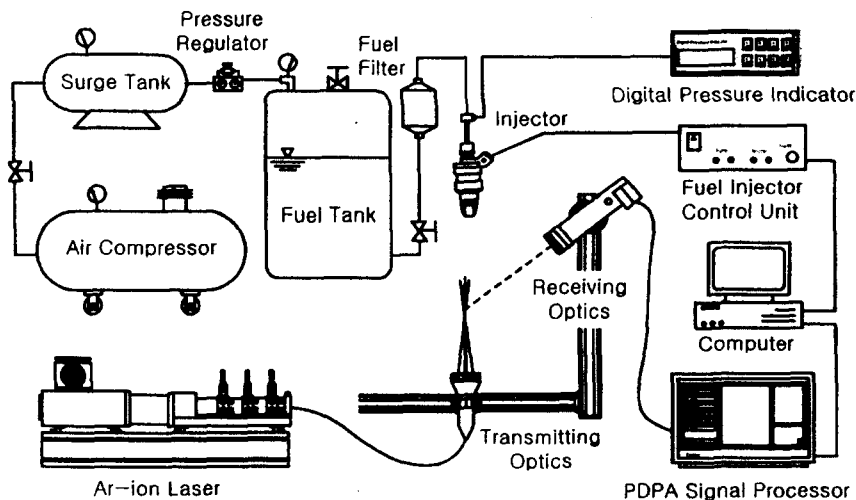


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

(DANTEC, 750mW)와 광섬유로 연결된 송광부와 수광부의 광학계 및 데이터 처리를 위한 신호처리기(DANTEC, 58N10)로 구성되어 있다. 이들 광학계들은 고정 벤치(bench)에 견고하게 고정되어 있으며, 수광부는 가솔린 액적의 최적 굴절 산란각을 이용하기 위하여 송광부와 58° 각을 이루도록 설치되었다. 따라서, 연료분사기는 일정한 위치에 고정하고, 3차원 이송장치에 부착된 고정 벤치의 광학계가 이송함으로서 측정위치를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2.2 측정방법

Fig. 2에 보이고 있는 핀틀형 연료분사기의 핀틀을 보호하고 있는 캡(cap)으로부터 측방향으로 3mm 떨어진 위치를 좌표계의 원점으로 하여 분무축 하방향(Z축)은 10~70mm까지 10mm 간격으로 반경방향(r축)은 분무 형상이 최대칭인 점을 감안하여 분무중심부터 2mm 간격으로 분무 외곽까지 측정하였다. 가압된 공기에 의해 형성되는 연료 공급압력은 200kPa, 300kPa, 400kPa로 일정하게 변화시켰다. 이 때

압력 변동은 0.08% 이하의 범위를 유지하였다. 컴퓨터에 의해 조절되는 분사 펄스 기간은 5ms로 고정하여 연료조절장치에 보내고 동시에 PDPA 측정장치에 입력 신호를 주었다. 분사 주기는 100ms (10Hz)로 설정하였으며, 한 측정점에서 10,000여개의 데이터를 측정하여 분사주기에 따른 시간분해(time resolved)방식을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

분사개시 이후의 시간 변화에 따라 얻어지는 액적의 속도와 크기분포를 고찰하기 위하여 연료분사압력 400kPa의 경우, 분사기 출구로부터 분무 하방향으로 Z=10mm, 70mm의 단면에서 반경방향에 관하여 0.5ms 시간간격으로 평균하여 각각 Fig. 3(a), (b)에 도시하였다. Z=10mm인 Fig. 3(a)에서 핀틀의 영향으로 분무가 중공형상을 함으로서 분무 중심 영역보다는 반경방향으로 2mm 떨어진 위치에서 최대 속도분포를 보이고 있으며, 액적크기 역시 주변무가 통과하는 유동 시간동안에 r=2mm 위치

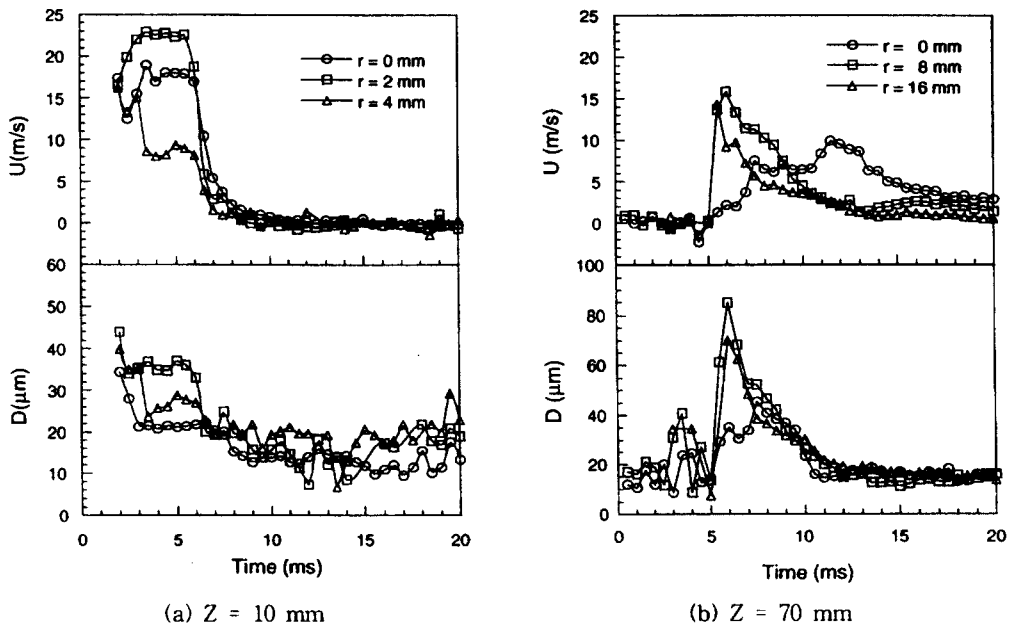


Fig. 3 Variation of droplet velocity and size with time at $P_f = 400kPa$

에서 다소 크게 나타나고 있다. 분사개시 이후 약 2ms 이후부터 데이터의 측정이 이루어지는 것으로 보아 Z=10mm에서 분무 선단이 통과하는 시간이 대략적으로 2ms 이후 임을 짐작할 수 있다. 분무 하류 영역인 (b)의 Z=70mm의 경우, r=0mm인 분무중심을 제외한 다른 반경방향 위치에서는 분사 개시 이후 약 6ms 시간영역에서 최대 속도와 액적 크기가 나타나고 있다. 이는 높은 속도와 큰 액적들이 나타나는 분무 선단이 측정위치를 통과하기 때문이라 생각된다. 따라서, 6ms 이전의 작은 속도의 액적들은 앞선 분사시간에 형성된 운동량이 거의 소멸된 부유하는 액적들이라고 판단된다. r=8mm는 다른 반경 위치와 비교하여 최대 액적크기와 속도가 가장 크게 나타나는 것으로 미루어 보아 핀틀형 분사기에 의해 형성되는 중공형(hollow type) 분무구조에서 액적 밀집도가 높은 영역으로 사려된다.

축방향거리 Z=70mm 위치의 분무 중심으로부터 반경방향으로 8mm 떨어진 액적 밀집도가 높은 곳에서 연료분사압력 변화에 의한 액적의 속도와 크기의 시간에 따른 분포를 Fig. 4에 보이고 있다. 연료 분사압력이 증가할수록 액적의 최대 속도와 크기가 나타나는 시점이 빠른 것으로 보아 측정위치에 도달하는 분무선단의 시간이 짧게 나타남으로서 관통도가 큼을 짐작할 수 있다. 또한, 분사압력이 클수록 최대 속도의 값은 증가하고 있으며, 반면에 액적의 크기는 분사압력 200kPa일 때 145 μ m에서 분사압력이 400kPa로 증가함에 따라 85 μ m로 감소하고 있다. 그러므로, 분사압력이 증가할수록 미립화가 향상됨을 알 수 있다.

액적 크기와 속도의 상관관계를 고찰하기 위하여, 본 연구에서는 PDPA에 의해 분사 개시 이후의 시간 변화에 따라 얻어진 데이터로부터 분무선단 도달시간에서부터 분사기의 연료 분사시간(5ms)을 더한 시간 영역을 주분무 유동영역이라 정의하고, 이후의 분석에 이용하였다. Fig. 5는 앞의 Z=70mm 단면의 반경방향거리 8mm 위치의 경우에 각각의 연료 분사압력에 따른 주분무 유동영역의 분포를 보이고 있다. 연료의 분사압력이 작을수록 액적들의

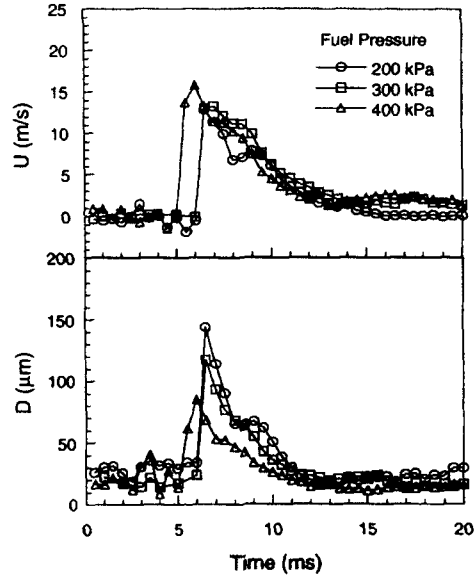


Fig. 4 Variation of droplet velocity and size with time at Z=70mm (r=8mm)

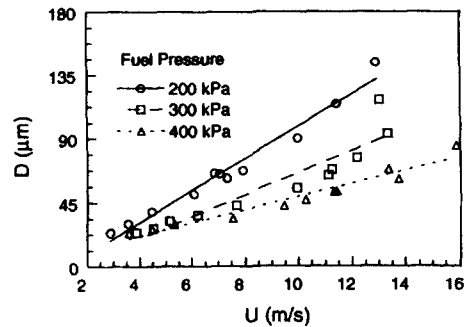


Fig. 5 Distribution of droplet velocity and size at main spray region

속도와 크기는 증가하고 있으며, 각각의 분사압력에 있어 보다 큰 액적들이 보다 높은 속도를 보임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 고려한 주분무 유동영역 동안에 분무하류의 액적 밀집영역에서 액적들은 관성력의 영향을 받으며, 분사압력이 증가할수록 작은 액적크기분포를 갖는다는 것을 확인 할 수 있다.

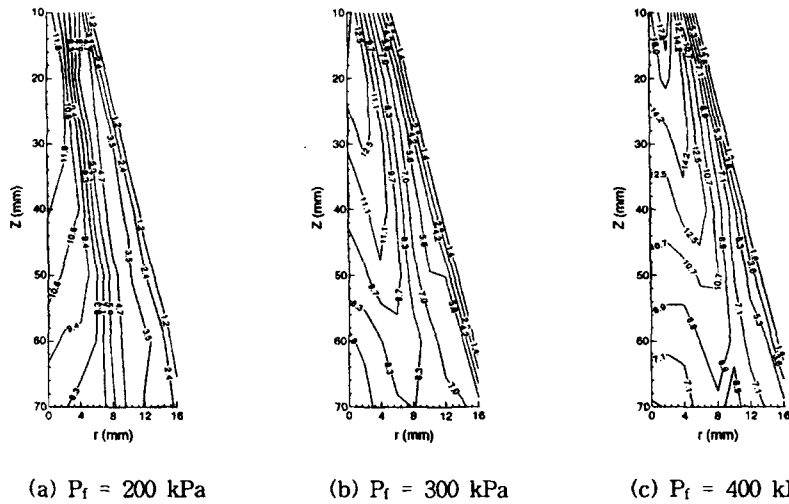
분무에 의해 형성되는 유동장을 고찰하기 위하여 주분무 유동영역에서 축방향속도와 반경방향속도의 합성속도에 대한 연료 분사압력

에 따른 등속도 선도를 Fig. 6에 나타내었다. 분사압력이 증가할수록 각각의 축단면에서 최대 속도분포를 보이는 위치가 분무 중심에서 분무 외곽 쪽으로 이동하여 나타남을 볼 수 있다. 이는 분사압력이 증가함으로써 분무의 확산이 증가하여 운동량이 크게 나타나는 액적들의 밀집된 영역이 다소 분무 외곽으로 치우쳐 나타난다고 생각된다. 또한, 분사압력이 증가할수록 전체 분무영역에 걸쳐 높은 속도분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 전체 분

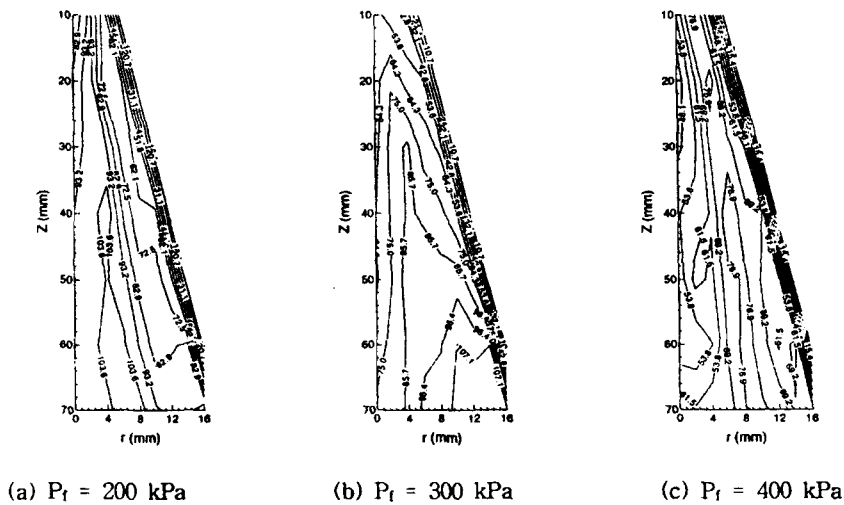
무 유동장에 형성되는 SMD 분포를 분사압력에 따라 등SMD 선도로 나타낸 것이다. 분사압력이 증가할수록 분무 상류영역 보다는 분무 하류영역에서 향상된 미립화의 영향으로 작은 SMD 분포를 보이고 있다. 또한, Fig. 6의 최대 속도 분포를 보이는 영역에서 높은 SMD를 보이는 것으로 보아 주분무 유동영역의 액적 밀집도가 높은 영역에서 운동량의 영향으로 큰 SMD 분포와 높은 속도를 갖는다는 것을 알 수 있다.

액적크기분포에 따른 분무유동 특성을 파악



(a) $P_f = 200$ kPa (b) $P_f = 300$ kPa (c) $P_f = 400$ kPa

Fig. 6 Iso-contour of U and V resultant velocity on the fuel pressure



(a) $P_f = 200$ kPa (b) $P_f = 300$ kPa (c) $P_f = 400$ kPa

Fig. 7 Iso-SMD distribution on the fuel pressure

하기 위하여 Tokuoka와 Zhang 등^(8, 9)이. 선회 분사기의 분무구조 고찰에 적용한 4가지의 액적크기 부류인 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$, $30\mu\text{m} < D < 40\mu\text{m}$, $80\mu\text{m} < D < 90\mu\text{m}$, $130\mu\text{m} < D < 140\mu\text{m}$ 에 따른 분무유동 속도분포의 액적크기분포 구간을 본 연구에서는 연료분사기의 분무특성을 고려하여 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m} < D < 50\mu\text{m}$, $60\mu\text{m} < D < 100\mu\text{m}$, $110\mu\text{m} < D < 150\mu\text{m}$ 의 4가지 영역으로 액적크기분포 영역을 확장하여 설정하였다. Fig. 8에 주분무 유동영역에서 유동하는 모든 액적들을 평균한 축방향속도(U)와 반경방향 속도(V)를 합성한 속도분포($R = \sqrt{U^2 + V^2}$)와 함께 4가지의 액적크기 부류에 따른 합성속도 분포를 분사압력 200kPa, 300kPa, 400kPa, 축방향 거리 70mm 위치 단면에서 반경방향 분포를 보이고 있다. 공기의 유속을 잘 따르는 작은 액적들인 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$ 는 아주 낮은 속도분포를 보이고 있으며, 분사압력이 작을수록 $20\mu\text{m} < D < 50\mu\text{m}$ 의 액적크기 부류와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 주분무 유동 동안에 형성되는 모든 액적들을 평균한 속도분포는 분사압력이 높은 400kPa의 분무 중심에서 $20\mu\text{m} < D < 50\mu\text{m}$ 의 액적크기 부류와 거의 일치하는 것으로 보아 이 영역에서는 $20\mu\text{m} < D < 50\mu\text{m}$ 범위의 액적크기가 주로 분포하며 유동하고 있음을 짐작할 수 있다. 비교적 큰 액적크기분포에 속하는 $60\mu\text{m} < D < 100\mu\text{m}$ 는 $20\mu\text{m} < D < 50\mu\text{m}$ 액적크기 부류 보다 2배 이상의 큰 속도 분포를 보이고 있다. 높은 분사압력인 400kPa의 분무 중심영역에서는 $100\mu\text{m}$ 이상의 액적크기분포가 존재하지 않음을 알 수 있다. 전체적으로 주분무 유동영역에서는 운동량의 영향으로 인하여 보다 큰 액적들이 높은 속도 분포를 보이는 특징들이 나타나고 있다.

Fig. 9는 Fig. 8에서 보인 4개의 액적크기 부류에 따른 전체 분무유동장의 속도분포를 벡터 선도로 도시하였다. 액적크기가 작아 비교적 공기유동을 잘 따라 분사된 분무의 공기유동을 나타내는 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$ 액적크기분포의 경우, 분무 상류의 분무 중심에서 보다 높은 속도분포를 보이며, 분무 외곽 영역에서 분무 중심영역으로 분무유동이 유입되는 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나, $20\mu\text{m} < D < 50\mu\text{m}$

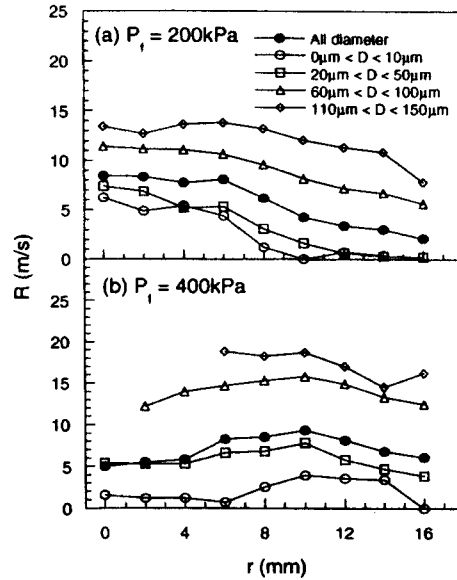


Fig. 8 Distribution of U and V resultant velocity on the droplet sizes class

의 액적크기 부류에서는 분사압력이 작은 (a)에 비해 분사압력이 높은 (b)에서 분출되는 운동량이 상대적으로 높기 때문에 분무외곽 영역에서의 유입현상은 나타나지 않고 있다. 액적크기 부류가 클수록 속도분포의 크기도 증가함을 알 수 있으며, $110\mu\text{m} < D < 150\mu\text{m}$ 경우의 액적들은 분사압력이 400kPa인 (b)의 경우, 분무 중심 영역에서는 나타나지 않고 있다. 따라서, 분사압력 400kPa의 경우 분무 중심영역에서는 $110\mu\text{m}$ 이상의 큰 액적들이 존재하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10은 분무에 의해 형성되는 공기유동에 대한 액적들의 유속 크기를 평가하기 위하여 공기유동이라 고려한 각각의 분사압력에 대한 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$ 액적크기 부류의 축단면의 합성속도의 평균유속(R_{air})으로 각 액적크기 부류로 형성되는 합성속도의 유속(R)을 나누어 도시한 것이다. (a)의 $Z=40\text{mm}$ 에서는 분사압력의 영향을 받아 공기의 유속이 상대적으로 높기 때문에 작은 액적크기 부류인 $20\mu\text{m} < D < 50\mu\text{m}$ 의 경우, 약 1.5~1.7배 정도의 크기를 가지며 분사압력 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않음을 볼 수 있다. 큰 액적크기 부류인 $110\mu\text{m}$

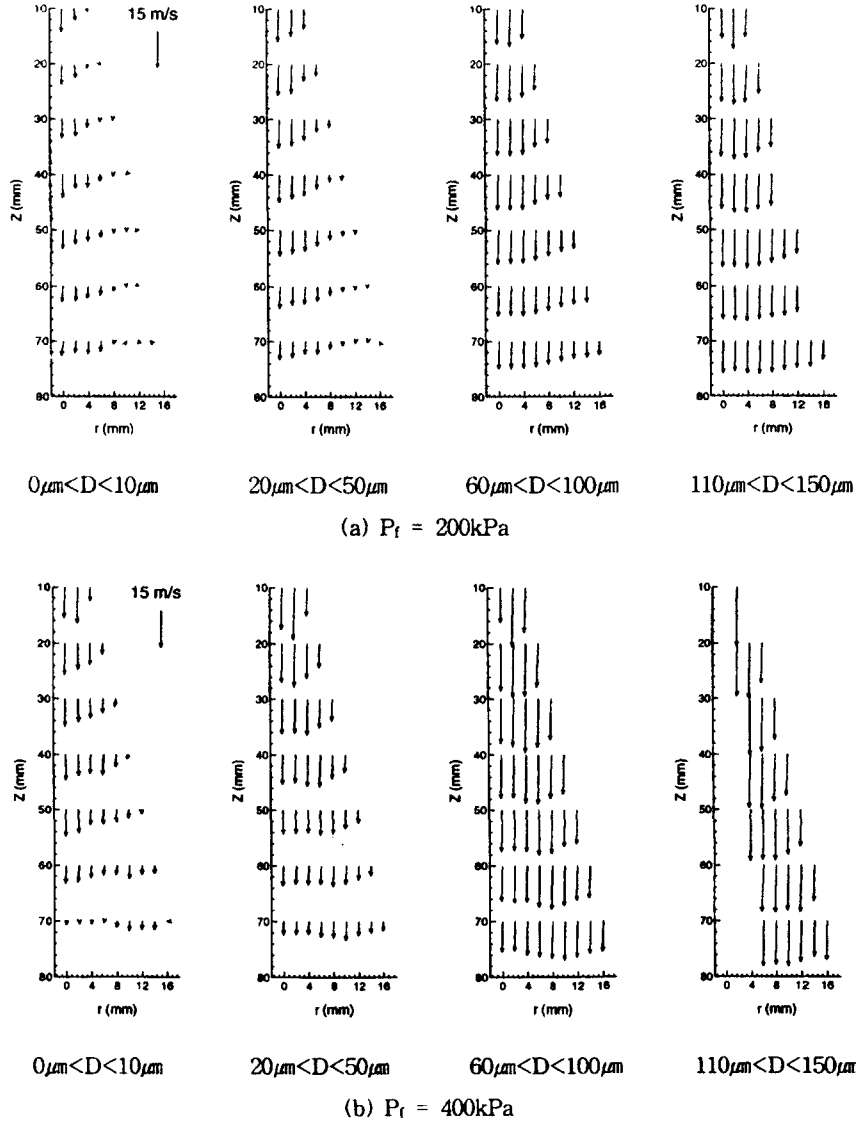


Fig. 9 Vector plot of U and V with droplet sizes class

$<D < 150\mu\text{m}$ 는 2.8~3.7배 정도의 크기를 가지며, 분사압력이 작은 200 kPa의 경우 분사압력이 높은 경우에 비교하여 높게 나타나고 있다. 이는 분사압력이 증가함에 따라 공기유속이 상대적으로 증가하여 공기유동에 의해 액적들의 유동 특성이 좌우된다고 생각된다. 그러나, (b)의 $Z=70\text{mm}$ 에서는 분사압력이 증가할수록 각각의 액적크기 부류에서 액적의 유속은 증가하여 $110\mu\text{m} < D < 150\mu\text{m}$ 의 경우 분사압력 400kPa에서 공기유속의 8.5배의 크기를 갖는 것을 볼 수

있다. 따라서, (a)의 축방향 거리 $Z=40\text{mm}$ 단면에서는 공기유속이 액적들의 유동특성에 영향을 주지만, 보다 분무하류인 (b)의 $Z=70\text{mm}$ 에서는 분사압력에 의한 공기유동에 의한 영향은 사라지고 액적들이 가지고 있는 관성력이 지배적으로 작용하여 분무에 의해 형성된 공기유속과 비교하여 상대적으로 높은 속도분포를 보이는 것으로 판단된다.

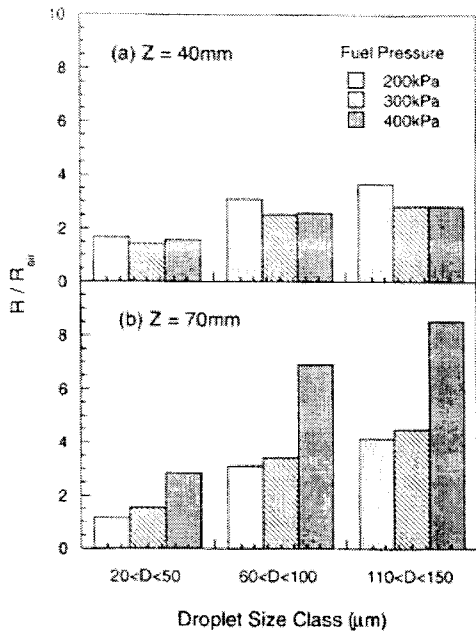


Fig. 10 Mean velocity of droplet sizes class for spray air flow velocity

4. 결론

연료 분사압력 변화에 따라 간헐적으로 분사되는 분무의 액적 속도와 크기의 상관관계와 분포를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

분무선단이 도달하는 시간영역은 운동량이 크기 때문에 액적 크기와 속도가 모두 높게 나타났다. 분무상류인 Z=10mm에서는 분무 중심에서 2mm 떨어진 반경방향 위치에서 최대 액적크기와 속도를 보였고, 분무하류에서 Z=70mm의 반경방향 거리 r=8mm에서 최대 액적크기와 속도를 나타내는 것으로 보아 액적이 밀집되어 나타나는 핀틀형 분사기의 중공형 분무구조가 분무 하방향에도 존재함을 알 수 있다.

분사압력이 증가함에 따라 미립화는 향상되었으며, 분무상류 영역에서는 분사압력이 액적들의 유동을 지배하고 분무하류인 Z=70mm 축단면에서는 분무에 의해 형성된 공기유동보다 액적들이 가지는 관성력의 영향이 크게 작용하였다.

후 기

본 연구 과제는 과학재단의 해외 Post-doc 연구 지원 사업에 의해서 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. M. C. Lai, F. Q. Zhao, A. A. Amer and T. H. Chue, " An Experimental and Analytical Investigation of the Spray Structure from Automotive Port Injectors ", SAE 941873, pp. 833~852, 1994
2. J. B. Dementhon and F. Vannobel, " Phase Doppler Anemometry in Gasoline Sprays : in Atmosphere and in a Steady Flow Rig ", Conference of Liquid Atomization & Spray System, ILASS-Europe, pp. 48~53, 1991
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, 1990
4. 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
5. J. Y. Koo and J. K. Martin, " Droplet Sizes and Velocities in a Transient Diesel fuel Spray ", SAE 900397, pp.929~947, 1990
6. 김원태, 강신재, 노병준, " 간헐적인 연료분

- 무의 유동특성에 관한 연구 ", 대한기계학회논문집(B). 제21권, 제9호, pp. 1198~1206. 1997
7. 김원태, 오제하, 강신재, 노병준, " 가솔린 엔진용 분사노즐의 간헐적인 분무특성 ", 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제3호, pp. 128~136. 1997
8. N. Tokuoka, Y. Yamaguchi, M. Takada and F. Zhang, " The Spray Structure from Swirl Atomizers (Part 1 : General Structure of the Spray) ", ICLASS-91, Paper 21, pp. 231~240, 1991
9. F. Zhang, Y. Yamaguchi, M. Takada and N. Tokuoka, " The Spray Structure from Swirl Atomizers (Part 2 : Effect of Injection Pressure and Atomizer Characteristics on the Spray Structure) ", ICLASS-91, Paper 22, pp. 240~248, 1991