

와류형 고압 분무의 속도 및 입경분포에 관한 연구

최동석* · 류경훈** · 차건중* · 김덕줄*
(1999년 3월 22일 접수)

A Study on the Distribution of Droplet Velocity and Diameter in a High-Pressure Swirl Spray

Dong-Seok Choi, Kyung-Hoon Ryu, Keun-Jong Cha and Duck-Jool Kim

Key Words: Gasoline Direct Injection Engine(직분식 가솔린 기관), High-Pressure Swirl Injector(와류형 고압 인젝터), PDA(Phase Doppler Anemometer, 위상 도플러 입자분석기), Time Dividing Method(시간 분해법), Correlation(상관관계)

Abstract

High-pressure swirl injectors have usually been employed in Gasoline direct injection engines due to their spray characteristics and the feasibility of their control. Thus the microscopic characteristics of high-pressure swirl spray were investigated by PDA. The correlation between axial and radial velocities and the correlation between droplet size and axial velocity were examined with different axial and radial positions. Two dimensional droplet velocity and its number distribution with size-classified droplets were illustrated. The mean droplet velocity and its SMD were also analyzed at the center of spray, the position having maximum mean axial velocity, and the spray periphery using time dividing method. Finally, the structure of high-pressure swirl spray was presented with the size distribution and velocity profile of droplets.

기호설명

C_{du} : 입경과 축방향 속도와의 상관계수
 C_{wv} : 축방향 속도와 반경방향 속도와의 상관계수
 d : 입경 [μ m]
 r : 반경방향 거리 [mm]
 r_0 : 분무중심 [mm]
 r_{umax} : 최대 축방향 속도가 나타나는 반경방향의 위치 [mm]
 r_{sp} : 분무경계 [mm]
 SMD : Sauter평균입경 [μ m]

t_0 : 액적이 처음 계측되는 시간[ms]
 t_1 : t_3 의 1/3이 되는 시간[ms]
 t_2 : t_3 의 2/3이 되는 시간 [ms]
 t_3 : 최대 축방향 속도의 1/2이 되는 최대 시간 [ms]
 u : 축방향 속도 [m/s]
 u_{max} : 최대 축방향 속도 [m/s]
 \bar{u} : 축방향 평균속도 [m/s]
 \bar{u}_{max} : 최대 축방향 평균속도 [m/s]
 v : 반경방향 속도 [m/s]
 \bar{v} : 반경방향 평균속도 [m/s]
 z : 축방향 거리 [mm]

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 대학원 기계공학과

1. 서론

최근 저공해 및 저연비 기관의 필요성으로 GDI 기관의 개발이 국내외적으로 진행 중에 있으며, 특히 분사장치로서 제어의 단순성과 직접분사에 유리한 분무특성 때문에 와류형 고압 인젝터가 연구의 대상이 되고 있다.^(1~4)

와류형 분무의 특징은 노즐내부의 와류실을 통하여 강한 와류를 형성시킨 다음 노즐 출구로 분출하는데 있다. 따라서 분무 중심축 부분에 공기코어가 형성되며 분무각을 다양하게 조절할 수 있다. 또한 단공 노즐에 비해 낮은 분사압력에서 미립화가 가능하며 분사압력이 높을수록, 분사각이 클수록 미세한 액적을 형성한다.

와류형 고압 분무의 발달과정은 인젝터 출구부근의 초기 무화과정과 분무가 판통·성장되는 동안 발생하는 미립화과정이 있다. 초기 무화과정은 액주 또는 액막이 액적으로 완전히 분열되지 않은 상태이므로 주로 2차원 계측법을 사용하여 분무의 형태를 조사한다. Shelby 등⁽⁵⁾은 가시화 엔진 내부에서 평면 레이저 유도형광법을 사용하여 분무각과 분사압력의 변화에 따라 분사초기의 분무 발달을 가시화하여 지연상, 솔리드제트, 증공 원추형, 발달된 분무상으로 구분하였다. 저자 등⁽⁶⁾은 분무각 26도의 와류형 고압 인젝터를 대상으로 분사압력의 변화에 따라 분무의 형상변화와 파도 분사압력에 의한 분무상호간의 충돌현상을 규명하여 버섯형 돌기형성, 1차충돌, 2차충돌, 분무성장의 4단계로 초기분무의 분열과정을 구분하였다.

한편 분무가 판통·성장되는 동안 발생하는 미립화과정은 분무유동에 의해 발생하는 주위기체의 유입과 분열된 개개의 액적들간의 상호작용에 의해 미립화가 진행된다. 분무의 형태, 분무각, 판통도와 같은 거시적 분무특성을 측정할 수 있는 2차원 계측법과 달리 미립화에 직접적인 영향을 미치는 액적의 속도 및 입경에 대한 높은 시간분해능을 가진 계측법이 필요하다. 따라서 PDA를 사용한 1차원 계측법이 미립화 과정을 파악하는데 보다 적합하다. Tokuoka 등⁽⁷⁾은 PDA를 사용하여 와류형 분무의 미시적인 구조를 조사하였다. 사용된 와류형 분무 노즐은 연속분무에 사용되는 것이었으나 데이터 해석방법에서 크기별로 분류된 액적들의 속도분포를 제시하여 큰 액적들과

작은 액적들의 거동의 차이를 밝힌 바 있다. 또한 Ishima 등⁽⁸⁾도 데이터 해석방법에서 시간 분해법을 사용하여 간헐분무의 액적속도와 입경과의 비정상적인 상관관계를 설명하였다. Zhao 등⁽⁹⁾은 2차원 Mie산란기법을 사용하여 와류형 고압 분무를 가시화하고 분무 미립화과정을 PDA를 사용하여 조사하였다. 분무의 분열과 미립화특성에 대한 인젝터의 기하학적 형상, 연료 분사압력, 분사기간, 분위기압력, 연료의 성질이 자세하게 연구되었다. Yamauchi 등⁽¹⁰⁾은 와류형 고압 분무의 거동에 대한 분사조건의 변화의 영향에 대하여 수치해석하였으며, 그 결과를 PDA의 측정값과 비교하였고, 큰 액적들의 현상을 포함하는 증공 원추형 분무의 구조를 수치적으로 재구성하는 방법을 제시하였다. Shin 등⁽¹¹⁾은 와류형 분무를 분사압력의 변화에 따라 축방향 10, 30, 60mm의 거리에서 속도와 입경의 측정을 통하여 속도와 입경과의 상관관계에 대해 조사하였다. Preussner 등⁽¹²⁾은 인젝터 팁으로부터 30mm 떨어진 위치에서 분위기 압력과 온도, 분무각, 분사압력의 변화에 따른 SMD의 변화를 조사하였다. 이상의 선행연구들은 수치해석적으로 거시적 분무의 형태와 입경 및 속도분포에 관한 정보를 제공했을 뿐 실험적으로 분무 전반에 걸친 입경과 속도에 관한 연구는 부족하다. 또한 실험적 연구들은 분위기 압력 및 온도, 분사압력, 분무각 등과 같은 변화에 초점을 맞추었고 측정점도 분무축방향으로 몇군데에 불과하였다. 따라서 와류형 분무 전반에서 속도분포와 입경에 대한 자세한 정보를 제공하지 못하고 있다.

본 연구에서는 와류형 고압 분무를 대상으로 PDA를 사용하여 분무중심, 최대 축방향 속도나 나타나는 위치, 분무경계를 중심으로 축방향 및 반경방향의 속도와 그것들의 상관관계, 크기별로 분류된 액적군의 평균속도 분포 및 갯수분포, 시간 분해법에 의한 평균속도 분포 및 SMD분포, 축방향속도와 입경의 상관관계를 통하여 와류형 고압 분무의 미시적구조를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 와류형 고압 분사계와 PDA장치

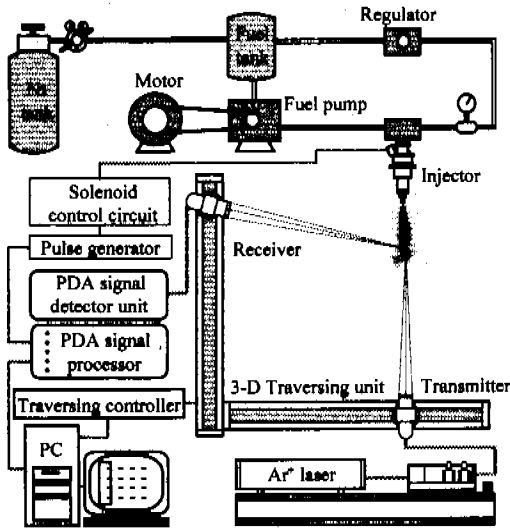


Fig. 1 Experimental setup.

로 구성되어 있다.

분사계는 와류형 고압 인젝터, 압력조절기, 연료펌프 및 구동모터, 연료탱크, 질소탱크로 구성되어 있다. 연료펌프를 구동하기 위해 연료탱크로부터 가압된 연료가 흡입되어야 하므로 고압질소로서 0.3MPa로 연료를 가압하였다. 연료펌프에서 송출된 연료는 인젝터에서 분사되고, 잉여연료는 압력조절기를 지나 연료탱크로 다시 돌아온다. 연료 분사압력은 인젝터의 출구측에 연결된 압력조절기에 의해 요구압력으로 조절되며, 인젝터와 압력조절기 사이에 압력계를 설치하여 연료 분사압력을 확인하였다. 인젝터는 솔레노이드 구동형이며, 구동신호는 디지털 신호 발생기에서 주어지며, 이 신호는 자체 제작한 솔레노이드 제어회로를 거쳐 인젝터를 구동시킨다.

분무의 입경과 속도를 측정하기 위해 PDA장치를 사용하였다. PDA의 광원으로 최대 출력 5W인 Ar-ion레이저를 사용하였다. 송광부와 수광부 렌즈의 초점거리는 각각 400mm이며 산란각은 30도로 설정되었다. PMT고전압은 현 조건에서 데이터율이 최대이고 입경의 변화가 거의 안정화된 1200~1500V의 범위로 설정되었다.

연료는 순도가 99%, 밀도가 $0.692 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 굴절률이 1.392인 이소옥탄(Trimethylpentane, C_8H_{18})이 사용되었다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 와류형 고압 인젝터의 선단의 형상을 나타낸 그림이다. 이 인젝터의

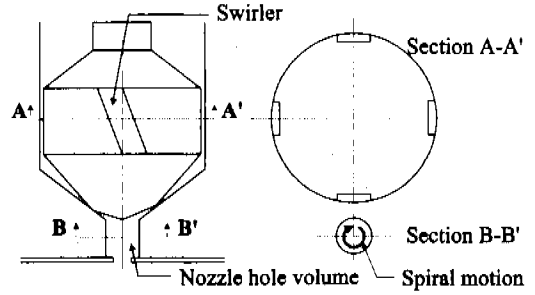


Fig. 2 Tip configuration of high-pressure swirl injector.

특징은 한 개의 와류기(swirler)를 가진 심플렉스(simples)형 노즐로서 분출된 연료는 시계방향으로 회전하는 와류분무를 형성한다. 인젝터 선단에 분공직경보다 작은 원판이 부착되어 분무각을 26도로 조절한 인젝터를 사용하였다. 니들과 시트사이의 체적 및 분공체적은 와류기를 통해 점선방향과 축방향의 속도를 가진 분무가 형성되는 분공체적(nozzle hole volume)으로 정의하였다.

2.2 실험조건 및 방법

와류형 고압 인젝터의 분무특성을 조사하기 위한 측정점을 Fig. 3에 나타내었다. 인젝터 선단을 원점으로 하고 반경방향으로 1mm간격으로 분무가 도달하는 위치까지 측정하였다. 분무축방향으로 10mm에서 30mm까지는 분무 상류로서 전체적인 분무의 특성이 여기서 결정될 것이라 예상되어 축방향을 2mm의 좁은 간격으로 측정하였다. 축방향 30mm에서 70mm까지는 5mm간격으로 측정하였다.

분사는 상온에서 분사압력을 5MPa로 하고 분사시간은 3ms로 하여 분사시켰다. 분사주기는 100ms(10Hz)로 설정하였다. 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 한 측정점에서 5000개의 데이터를 획득하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 속도분포

3.1.1 축방향 평균속도

Fig. 4는 간헐 분사한 다수 사이클의 값을 평균한 축방향 속도를 반경방향에 따라 나타낸 것이

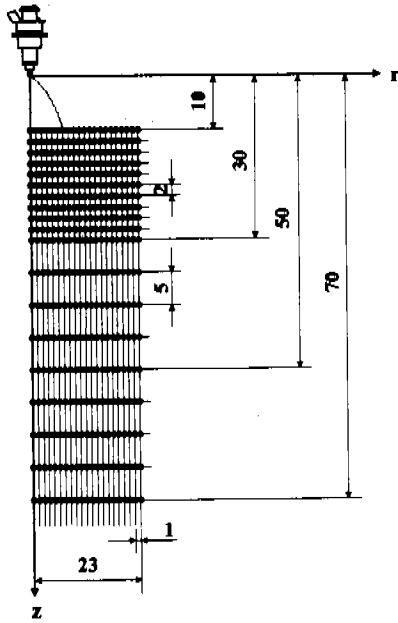


Fig. 3 Measurement points. (unit: mm)

다. 축방향으로의 위치에 관계없이 평균속도가 증가하다가 최대값을 가진후 감소하는 경향을 나타내고 있고, 하류로 갈수록 최대 축방향 평균속도의 크기는 작아지고 위치는 분무 외곽쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이것은 하류로의 이동에 따른 분무주류의 와류 운동량의 감소와 공기의 저항 및 유입에 의한 것으로 생각된다. 인젝터 선단 부근 ($z=10\text{mm}$)에서 평균 축방향 속도가 다른 위치에 비해 상대적으로 크고 반경방향이 증가함에 따라 급격히 증가후 감소하였다. 분무의 중간부분($z=30\text{mm}$, 50mm)인 경우, 평균 축방향 속도의 완만한 증가와 감소를 보이고 있다. 분무의 끝부분($z=70\text{mm}$)인 경우, 분무 중심축($r=0\text{mm}$)에서의 속도는 분무의 중간부분보다 다소 증가하나 축방향거리에 대해 가장 낮은 속도분포를 나타내고 있다.

3.1.2 반경방향 평균속도

Fig. 5는 반경방향으로의 거리에 따른 반경방향의 평균속도분포를 나타낸 것이다. 반경방향 속도가 양인 값은 분무의 중심에서 외곽으로, 음의 값은 분무의 중심을 향하여 액적들이 이동하는 것을 의미한다. 따라서 반경방향 평균속도가 영인 값은 축방향 속도만 존재하는 경우이다. 하류로 갈수록 반경방향 속도의 절대값은 감소함을

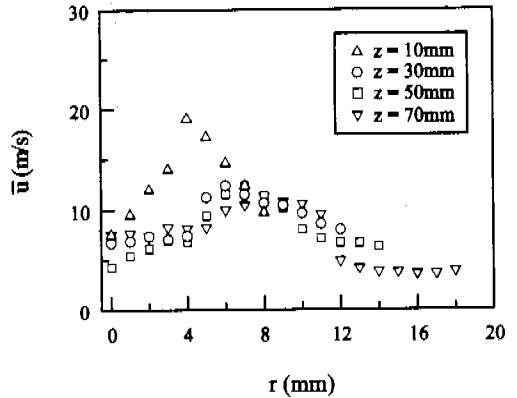


Fig. 4 Axial mean velocity with the axial and radial positions.

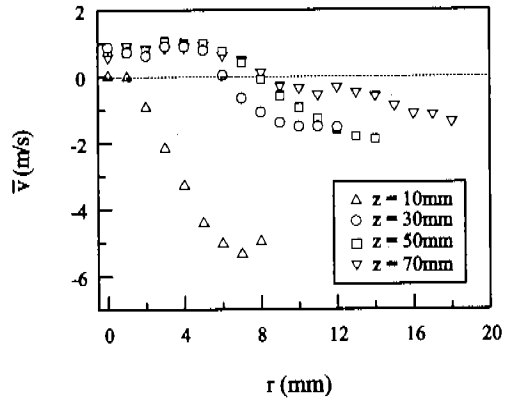


Fig. 5 Radial mean velocity with the axial and radial positions.

알 수 있다. 이것은 축방향 평균속도의 경우와 동일한 이유라고 생각된다. 또한 인젝터 선단 부근에서 분무중심으로 향하는 반경방향의 속도가 가장 크다. 이것은 와류형 분무의 초기 운동량이 크기 때문이다. 축방향거리에 대하여 특정한 반경방향거리 이상에서 반경방향 속도의 방향이 분무 중심으로 향하고 있는데, 이것은 분무주류와 주위 공기와의 속도차에 의해 주위공기가 분무측으로 유입되고 분무주류의 와류유동이 이 지점들에서 분무중심으로 향하기 때문으로 생각된다. 또한 반경방향의 속도의 크기가 작아지므로 하류로 갈수록 와류의 영향이 감소해감을 알 수 있다.

3.1.3 축방향과 반경방향 평균속도의 상관관계

Fig. 6은 축방향거리에 따라 최대 축방향 평균

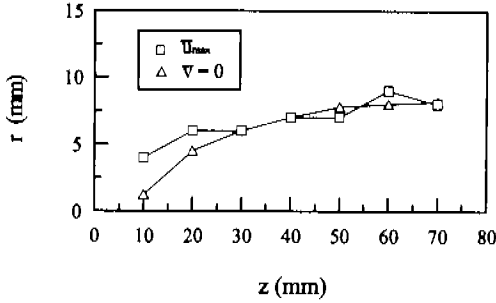


Fig. 6 Positions where mean axial velocity is maximum and radial mean velocity is zero.

속도를 갖는 반경방향 위치와 반경방향 평균속도가 영인 반경 방향위치(반경방향 속도구배가 바뀌는 위치)를 나타내었다. 최대 축방향 평균속도를 가지는 반경방향 위치는 하류로 갈수록 거의 1/2승에 비례하여 분무외곽으로 이동되는 경향을 보이고 있다. 이것은 하류로 갈수록 와류형 분무가 발달되기 때문이라고 생각된다. 반경방향의 평균속도구배가 바뀌는 위치는 인젝터 선단부근을 제외하고 최대 축방향 평균속도를 갖는 반경방향 위치와 거의 일치함을 볼 수 있다. 분무 중심축에서부터 반경방향의 속도구배가 바뀌는 위치까지는 반경방향 속도가 분무 외곽쪽으로 향하는데 이것은 분무주류의 와류 운동량이 주로 작용하기 때문이며, 이 위치에서 분무외곽까지는 반경방향 속도가 분무 중심으로 향하는데 이것은 유입공기의 운동량이 주로 작용하기 때문으로 생각된다. 즉 분무주류의 와류 운동량과 분무 외곽의 유입공기의 운동량이 이 위치에서 서로 합쳐지기 때문에 반경방향의 속도성분이 영이 되고 축방향 속도가 최대가 된다.

Fig. 7은 액적의 축방향 평균속도와 반경방향 평균속도의 상관관계를 선형적으로 피팅하여 구한 기울기를 측정위치에 따라 나타낸 것이다. 그림은 축방향 속도 대 반경방향 속도를 분무중심(r_0), 최대 축방향 속도가 나타나는 반경방향의 위치(r_{Umax}), 분무경계(r_{sp})에서 원데이터(raw data)를 예시한 것이다. 양의 상관관계는 반경방향 평균속도의 방향이 분무외곽이고, 음의 상관관계는 분무중심을 향하고 있음을 의미한다.

분무중심인 경우, 축방향 평균속도가 증가할수록 반경방향 평균속도도 다소 증가하는 약한 양

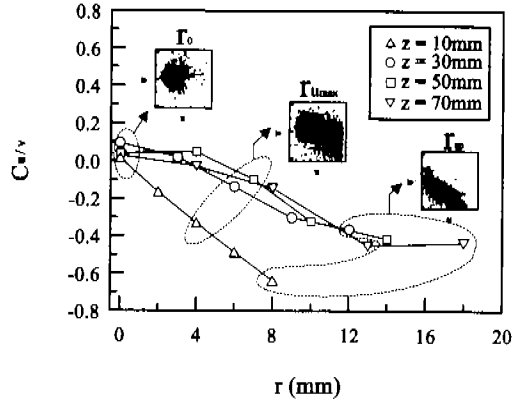


Fig. 7 Correlation between axial and radial velocity.

의 상관관계를 가졌다. 최대 축방향 속도가 나타나는 위치를 거쳐 분무경계로 갈수록 축방향 평균속도의 증가에 따라 반경방향 평균속도가 점점 감소되는 강한 상관관계를 나타내었다. 또한 인젝터 선단부근에서는 축방향 속도의 증가에 대해 반경방향 속도가 음의 속도로 치우침을 나타내었다. 즉 분무주류의 큰 속도에 의한 주위 공기의 유입속도가 큼을 알 수 있다. 따라서 와류형 분무는 분무중심보다 분무외곽으로 갈수록 축방향 속도와 반경방향 속도가 강한 음의 상관관계를 가진 속도장을 형성함을 알 수 있다.

3.1.4 액적크기에 따른 평균 속도분포

Fig. 8은 액적의 크기에 따른 분무유동 특성을 파악하기 위하여 전체 액적들을 각각 $0\mu m < d < 10\mu m$, $20\mu m < d < 30\mu m$, $40\mu m < d < 50\mu m$, $60\mu m < d < 100\mu m$ 의 4개의 액적군으로 나누어 분무 유동장의 속도 분포를 벡터로 나타내었다. 점선은 Fig. 6에서 구한 최대 축방향 평균속도를 가지는 위치를 연결한 선이다. $0\mu m < d < 10\mu m$ 의 액적군은 입경이 비교적 작아 공기의 유동을 잘 따르므로 분무에 의해 생기는 공기유동(secondary flow)을 관찰하기에 용이하다. 반면에 $d > 60\mu m$ 의 액적군은 입경이 비교적 크므로 주위공기의 유동보다는 분무주류의 와류유동(primary flow)을 관찰하기에 적합하다.

$0\mu m < d < 10\mu m$ 범위의 액적군은 인젝터 선단부근과 분무의 경계부분에서 주위공기의 유입성분과 분무중심부에서 축방향으로의 속도성분으로 보아 인젝터 선단부근과 분무외곽에서 분무중심으로의 큰 유입공기의 유동이 예상된다.

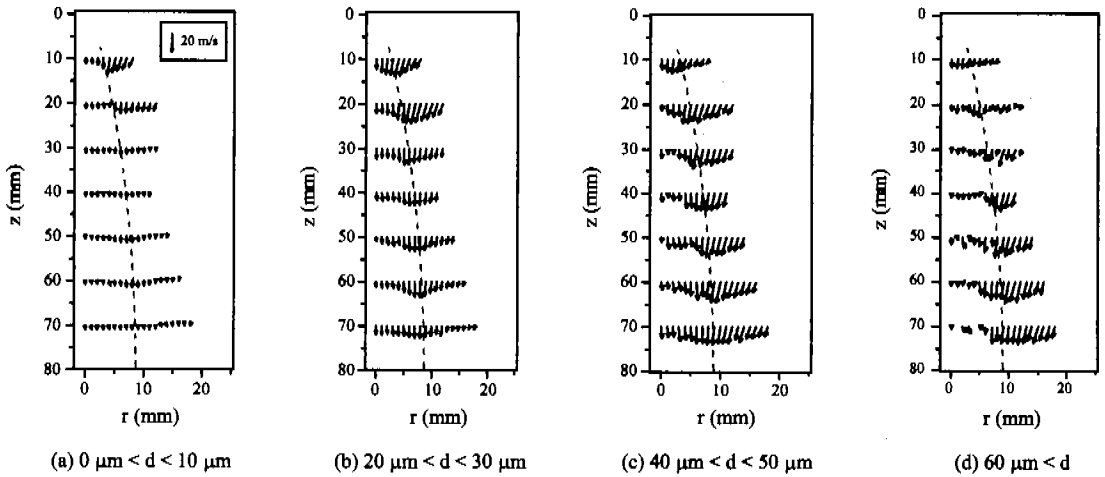


Fig. 8 Axial mean velocity with size-classified droplets.

20 $\mu\text{m} < d < 30 \mu\text{m}$ 범위의 액적군은 분무의 중심과 점선부근에서 분무 외곽으로 속도성분이 향하고 인젝터 선단과 분무의 경계부분에서는 분무중심으로 속도성분이 향하고 있다. 또한 분무주류의 와류유동의 영향으로 속도의 크기도 분무 중심부에서부터 반경방향으로 갈수록 증가하다가 점선부근에서 최대값을 가진 후 감소하는 경향을 나타내고 있다. 40 $\mu\text{m} < d < 50 \mu\text{m}$ 범위의 액적군은 20 $\mu\text{m} < d < 30 \mu\text{m}$ 범위의 액적군과 유사한 경향을 나타내고 있으며, 보다 큰 입경을 가진 액적이 와류의 영향을 크게 받아 속도의 크기가 더 커짐을 알 수 있다. 60 $\mu\text{m} < d$ 범위의 액적군은 액적의 수가 적어 다소 불균일한 속도분포를 보이며 분무하류와 경계부분에서 미립화된 작은 액적들의 합체로 인하여 다소 증가된 속도분포를 나타내었다.

3.1.5 시간 분해법에 의한 평균속도 분포

Fig. 9는 시간 분해법⁽⁸⁾을 적용하기 위한 시간 영역구분을 나타낸 그림이다. 최대속도의 1/2이 되는 최대시간을 t_0 로, 속도가 계속되는 시간 t_0 부터 t_3 까지의 시간을 삼등분하여 각각 t_1 과 t_2 로 구분하였다. t_0 부터 t_1 까지의 시간영역을 초기(Fore), t_1 부터 t_2 까지의 시간영역을 중기(Central), t_2 부터 t_3 까지의 시간영역을 후기(Rear), t_3 부터 분사후 30ms까지의 시간영역을 말기(Tail)로 구분하였다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 구분된 시간영역에서 평균된 속도를 축방향에 따라 분무중심(r_0), 최대 축방

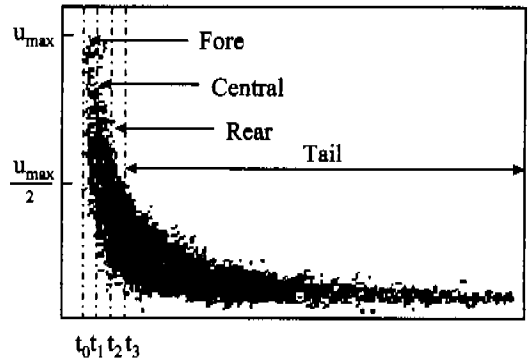


Fig. 9 Time-divided regions of velocity with time after injection start.

향 속도가 나타나는 반경방향의 위치(r_{umax}), 분무 경계(r_{sp})로 나누어 나타내었다. 또한 각각의 시간 영역과의 비교를 위하여 전 시간영역(All)에 대한 평균속도도 나타내었다.

분무중심인 경우, 전 시간영역에 대한 축방향 속도의 평균값은 인젝터 선단에서부터 하류로 갈수록 감소하다가 축방향 위치 50mm이후부터 증가하는 경향을 나타내었다. 초기, 중기, 후기도 유사한 경향을 나타내었는데, 이것은 하류로 갈수록 분무주류의 와류 운동량의 감소와 주위공기의 저항으로 속도가 감소하다가 원추형 내부의 압력차에 의한 미소액적들의 수축과 축방향 관통도를 향상시키는 독특한 축방향 공기유동에 의해 속도가 증가⁽¹²⁾된 것으로 생각된다. 또한 중기의 축방향 위치 70mm에서 속도가 영인 것은 발달된

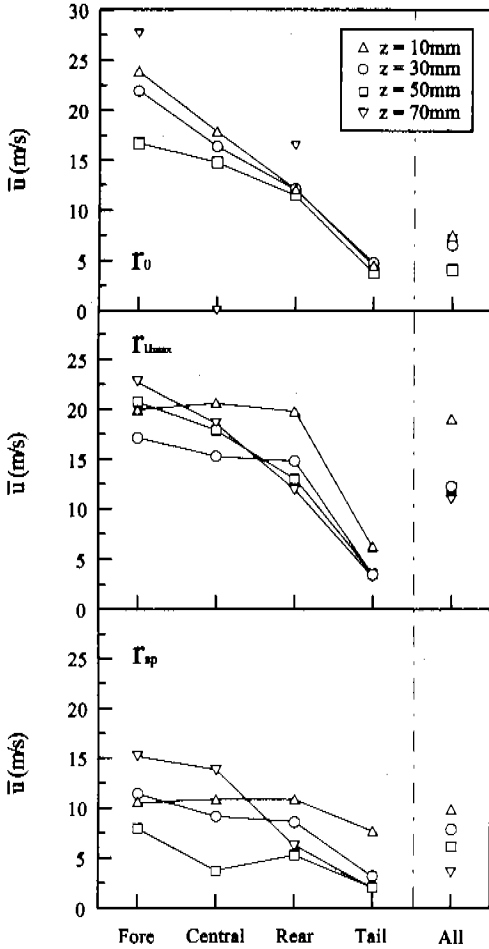


Fig. 10 Axial mean velocity with different time-divided regions.

와류유동과 주위공기의 유입 증대로 이 시간영역에서 액적이 존재하지 않기 때문으로 생각된다. 말기는 축방향의 위치에 관계없이 속도가 거의 일정하였다. 또한 분무중심에서는 분사후 시간의 경과에 따라 속도가 급격히 감소하였다.

최대 축방향 속도가 나타나는 반경방향의 위치인 경우, 전 시간영역에 대한 축방향 속도의 평균값은 인젝터 선단에서부터 하류로 갈수록 감소하였다. 초기와 중기의 축방향 위치 70mm에서의 속도가 높게 나타난 것은 분무중심의 경우와 동일한 이유로 생각된다. 후기이후에는 인젝터 선단에서 하류로 갈수록 속도가 감소하였다. 또한 축방향 위치 10mm와 30mm에서 후기까지 속도가 거의 일정한 것은 인젝터 선단에서 약 30mm까지

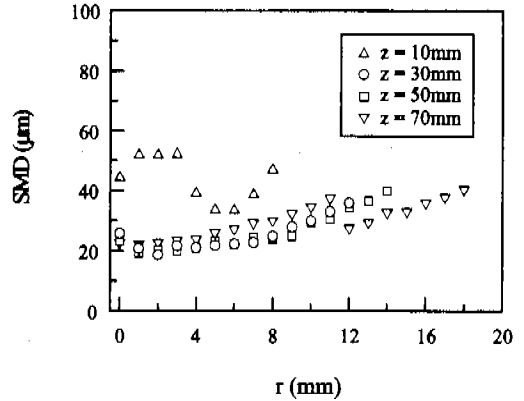


Fig. 11 SMD with the axial and radial positions.

는 분무주류의 와류운동량이 유지되기 때문으로 생각된다. 반면에 축방향 위치 50mm이후에는 속도가 급격히 감소되는 것으로 보아 주위공기의 저항으로 인한 분무주류의 와류운동량의 감소도 급격히 일어남을 알 수 있다. 또한 전 시간영역에서의 속도와 비교해 볼 때 축방향 위치 30mm 이상에서는 초기부터 후기까지의 시간영역에 다수의 액적이 분포하고 있음을 알 수 있다.

분무경계인 경우, 전 시간영역에 대한 평균 축방향속도는 인젝터 선단에서 하류로 갈수록 감소하였다. 분사후 시간의 경과에 따라 속도가 완만히 감소하며, 초기에 축방향 위치70mm에서 속도가 높게 나타난 것은 앞서 언급된 것과 동일한 이유라고 생각되며, 전 시간영역에서의 평균속도와 비교해 볼 때 초기의 빠른 속도는 소수의 액적에 의한 것임을 알 수 있다. 축방향 위치 10mm에서는 후기까지 분무주류의 와류운동량을 유지하여 속도가 거의 일정하나 그 이후에서는 주위공기의 저항으로 차츰 와류운동량이 감소되어 축방향 위치 70mm에서는 속도가 급격히 감소됨을 알 수 있다.

3.2 입경분포

3.2.1 SMD분포

Fig. 11은 반경방향의 거리에 따른 분부의 SMD분포를 나타낸 것이다. SMD는 반경방향으로 갈수록 증가하고 축방향으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 질량과 운동량이 큰 액적이 와류의 영향으로 분무 외곽으로 이동하고 그 위치에서 분무 외곽의 공기 유입성분과 만나

더 이상 분무 외곽으로 이동하지 못하고 그로 인한 액적의 합체현상 때문에 분무외곽에서 보다 큰 SMD분포를 보인다고 생각된다. 그러나 하류에서는 주위공기의 유입에 의한 미립화 효과에 의해 축방향 위치에 따라 큰 차이가 없이 거의 일정한 경향을 보였다. 이것으로 분무외곽으로 갈수록 큰 액적들의 수가 증가한다고 예상할 수 있다. 또한 인젝터 선단부근에서 SMD는 분무 중심에서 분무 외곽으로 갈수록 약간 증가하다가 감소후 다시 증가하였다. 이것은 SMD가 분무 중심에서 선두질량(leading mass)의 영향으로 증가하다가 분무 외곽으로 갈수록 유입공기에 의한 액적의 분열이 진행되어 감소후 다시 액적간의 합체로 증가하는 것으로 생각된다.

3.2.2 크기별로 구분된 액적군의 공간분포

Fig. 12는 입경에 따른 액적의 공간분포를 조사하기 위하여 3.1.4절에서 분류한 액적군에 대하여 나타내었다.

Fig. 11에서 고찰했던 것과 같이 전체적으로 입경이 작을수록 분무의 중심부에, 입경이 클수록 분무의 외곽에 다수의 액적이 분포하는 경향을 나타내고 있다. 주위공기의 유동을 예측할 수 있는 $0\mu m < d < 10\mu m$ 의 액적군은 주로 인젝터 선단부근과 분무의 중심부에 다수의 액적이 존재하였다. 이것은 Fig. 8에서 보았듯이 주위공기의 유동이 분무의 중심부를 향하기 때문으로 생각된다. $20\mu m < d < 30\mu m$ 의 액적군은 와류의 영향을 다소 받아 분무의 외곽쪽으로 다수의 액적들이 이동되어 있음을 볼 수 있고, 주로 최대속도가 나타나는 영역에 다수의 액적들이 분포하는 것으로 보아 이 액적군들이 와류형 분무의 속도장에 큰 영

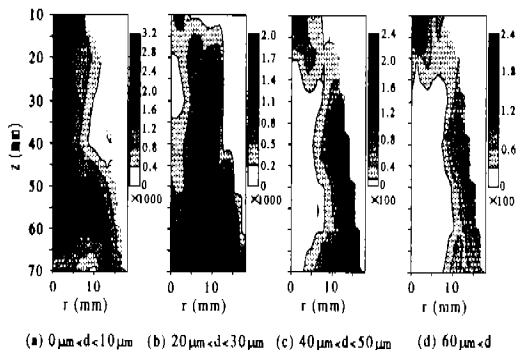


Fig. 12 Number distribution of size-classified droplets.

향을 주고 있음을 알 수 있다. $40\mu m$ 이상의 액적군들은 그 이하의 액적군에 비하여 소량이 존재하며 주로 분무의 외곽에 위치하고 있다. 이것은 앞서 언급했듯이 큰 질량에 의한 큰 운동량을 가지므로 와류유동의 영향을 받아 분무외곽으로 밀려나가기 때문으로 생각된다.

3.2.3 시간 분해법에 의한 SMD분포

Fig. 13은 시간 분해법에 의한 액적의 SMD분포를 나타낸 것이다. 각각의 시간영역은 Fig. 9와 Fig. 10에서 정의된 영역과 동일하다.

분무중심인 경우, 전 시간영역에 대한 SMD는 축방향 위치 10mm에서 가장크며 하류로 갈수록 주위공기의 유입에 의한 영향으로 액적의 크기가 작아졌다. 축방향 위치 30mm이상에서 시간의 경과에 따라 SMD가 증가하는 경향을, 축방향 위치

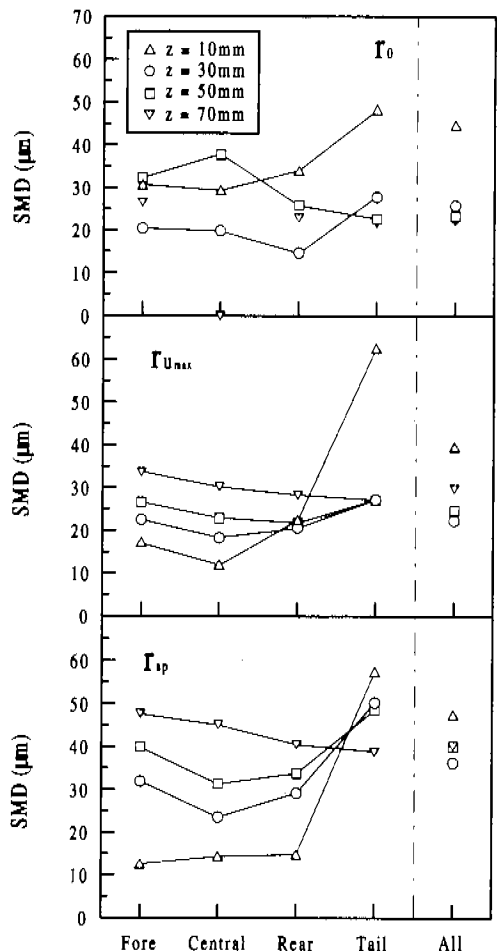


Fig. 13 SMD with different time-divided regions.

50mm이하에서 증가후 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 축방향 위치 30mm이상에서 후기이후에 SMD가 증가한 것은 낮은 분사압력으로 인한 다소 큰 액적들의 영향때문으로 생각된다. 또한 중기의 축방향위치 70mm에서 SMD가 영인 것은 Fig. 10의 평균 축방향 속도가 영인 것과 동일한 이유이다.

최대 축방향 속도가 나타나는 반경방향의 위치인 경우, 초기부터 후기까지 인젝터 선단으로부터 하류로 갈수록 SMD가 증가하는 경향을 나타내었고 말기는 축방향 위치 10mm를 제외하고 거의 일정하였다. 이것은 최대 축방향 속도로 인한 1차 미립화와 그로 인한 주위 공기의 유입으로 인한 2차 미립화 효과 때문에 인젝터 선단부근에서 작은 SMD를 가지며 하류로 갈수록 액적간의 합체로 인하여 SMD가 증가되기 때문으로 생각된다. 또한 말기의 축방향 위치 10mm에서 큰 SMD를 가지는 것은 분무중심에서와 같이 낮아진 분사압력에 의해 생성된 큰 액적의 영향으로 생각된다.

분무정계인 경우, 최대 축방향 속도가 나타나는 반경방향의 위치인 경우와 유사한 경향을 나타내나 주위공기의 영향을 상대적으로 많이 받는 위치이므로 SMD변화의 폭이 크다.

3.3 속도분포와 입경분포의 상관관계

Fig. 14는 축방향 속도와 입경을 선형적으로 피팅하여 구한 기울기의 최대값으로 각각의 측정위치에서의 기울기를 나눈 값을 상관관계의 지표로 나타낸 것이다. 또한 입경 대 축방향 속도의 반경방향위치에 따른 원데이터를 그림으로 예시하였다.

$z=10\text{mm}$ 를 제외하고 입경이 뜰수록 속도도 빠른 양의 상관관계를 나타내었다. 분무중심인 경우, 모두 양의 상관관계를 나타내며 최대 축방향 속도가 나타나는 위치에서 강한 상관관계를 가지며 분무외곽쪽으로 갈수록 상관관계가 작아지는 경향을 나타내었다. 이것은 분무중심에서는 앞서 고찰한 바와 같이 고속의 작은 입경의 액적이 다수 분포하기 때문이며, 최대 축방향 속도를 가지는 위치에서 $30\mu\text{m}$ 전후의 액적들이 최대 축방향 속도에 크게 기여하기 때문이다. 또한 분무정계에서는 다소 저속의 큰 액적이 많이 분포하기 때문이다. 인젝터 선단부근인 경우, 초기의 와류

운동량에 의해 입경이 작은 액적이 큰 속도를 지나 분무외곽으로 갈수록 저속의 큰 액적도 다수 존재함으로 반경방향에 따라 음의 상관관계물 가졌다.

3.4 와류형 고압분무의 구조

Fig. 15는 이상의 결과로부터 와류형 분무의 구조를 속도 및 입경분포로 나타낸 것이다.

속도장은 액적외 와류유동에 의한 1차유동(primary flow)과 주변부류와 주위공기간의 상대속도에 의한 공기유입의 2차유동(secondary flow)으로 구분된다. 주변부류의 와류유동과 주위 유입

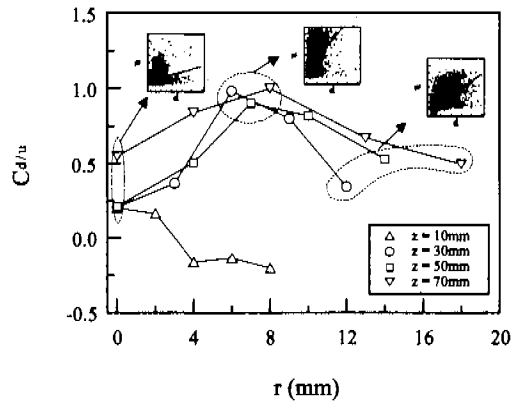


Fig. 14 Correlation between droplet size and axial velocity.

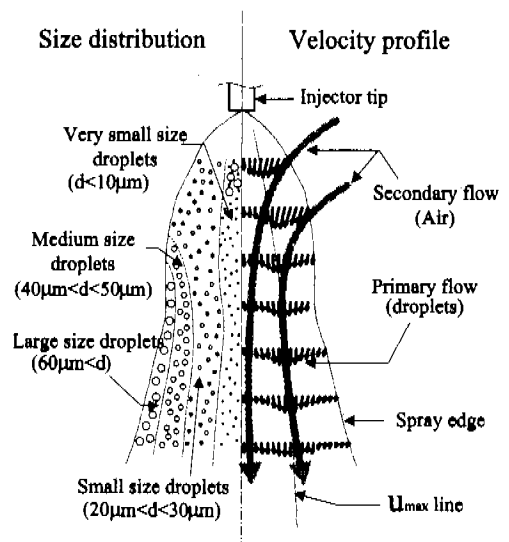


Fig. 15 Structure of high-pressure swirl spray.

공기간의 운동량 교환에 의해 최대 축방향 속도가 나타나는 영역이 생기며, 주위 유입공기는 분무의좌에서 분무중심쪽으로 유입된다.

액적의 분포로서 10 μ m 전후의 입경을 가진 액적은 분무중심부에, 30 μ m 전후의 입경을 가진 액적들은 최대 축방향속도 영역인 분무중심부와 분무경계사이에, 50 μ m이상의 입경은 분무경계부근에 분포한다.

4. 결 론

본 논문에서는 간헐분사되는 와류형 고압 분무의 미시적 분무특성을 고찰하기 위하여 PDA로 연료 액적의 속도와 입경을 동시에 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 축방향 평균속도는 반경방향에 따라 최대값을 가진후 감소하였고, 그 최대값은 하류로 갈수록 작아지고 분무의좌으로 이동하였다.
- (2) 반경방향 평균속도는 분무의 하류로 갈수록 감소하였고 속도구배의 전환점이 존재하였다.
- (3) 반경방 향속도에 대한 축방향 속도는 분무 중심에서 약한 양의 상관관계를, 분무의좌으로 갈수록 강한 음의 상관관계를 가졌다.
- (4) 입경 30 μ m 전후의 액적이 최대 속도영역에 다수 존재하였다.
- (5) 초기와 중기의 분무 하류에서 축방향 평균속도는 증가하였고 나머지 분무영역과 비교하여 큰 SMD를 가졌다.
- (6) 입경과 속도는 최대 축방향 속도 위치에서 강한 양의 상관관계를 가졌다.

참고문헌

(1) Evers, L. W., 1993, "Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector," *ILASS America 93*, pp. 111~115.
 (2) Naitoh, K., and Takagi, Y., 1996, "Synthesized Spheroid Particle(SSP) Method for Calculating Spray Phenomena in Direct-Injection SI Engines," *SAE Technical paper*, No.962017.

(3) Parrish, S. E., and Farrell, P. V., 1997, "Transient Spray Characteristics of a Direct-Injection Spark-Ignited Fuel Injector," *SAE Technical paper*, No.970629.
 (4) Cousin, J., Ren, W. M., and Nally, S., 1998, "Transient Flows in High Pressure Swirl Injectors," *SAE Technical paper*, No.980499.
 (5) Shelby, M. H., VanDerWege, B. A., and Hochgreb, S., 1998, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines," *SAE Technical paper*, No.980160.
 (6) 최동석, 김덕환, 고장권, 1998, "와류형 고압 인젝터의 초기분무의 분열 과도현상," 대한기계학회논문집, 제22권, 제8호, pp. 1132~1140.
 (7) Tokuoka, N., Yamaguchi, Y., Takada, M., and Zhang, F., "The Spray Structure from Swirl Atomizers," *Proceedings of ICLASS-91*, pp. 233~240.
 (8) Ishima, T., Long, W., and Obokata, T., 1997, "Time Dividing Analysis of Intermittent Fuel Spray Flows Measured by PDA," *Proceedings of ICLASS-97*, pp. 950~957.
 (9) Zhao, F., Yoo, J., Liu, Y., and Lai, M., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," *SAE Technical paper*, No.961925.
 (10) Yamauchi, T., and Wakisaka, T., 1996, "Computation of the Hollow-Cone Sprays from a High-Pressure Swirl Injector for a Gasoline Direct-Injection SI Engine," *SAE Technical paper*, No.962016.
 (11) 신민규, 박중호, 유철호, 이내현, 최규훈, 1997, "가솔린 직분식 인젝터의 분무 및 연소특성에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제5호, pp. 114~122.
 (12) Preussner, C., Döring, C., Fehler, S., and Kampmann, S., 1998, "GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance," *SAE Technical paper*, No.980498.