횡방향 유속 변화에 따른 고압 가솔린 팬형 인젝터의 분무특성

Spray Characteristics of High Pressure Fan Spray Injector with Various Crossflow Speed

최재준*·문석수*·배충식*

Jaejoon Choi, Seoksu Moon and Choongsik Bae

Abstract

The direct injection into the cylinders has been regarded as a way of the reduction in fuel consumption and pollutant emissions. The spray produced from the injector of DISI(Direct Injection Spark Ignition) engine is of paramount importance in DISI engines. Fan-spray injector as well as swirl-spray injector was developed and utilized to the DISI engines. The interaction between air flow and fuel spray was investigated in a steady flow system embodied in a wind tunnel to simulate the variety of flow inside the cylinder of the DISI engine. The direct Mie scattered images presented the macroscopic view of the liquid spray fields interacted with crossflow. Particle sizes of fuel droplets were measured with phase Doppler anemometer(PDA) system. A faster cross-flow field made SMD larger and D_{10} smaller.

The experiments show the interaction of air flow field and the fuel spray field of fan-spray. The results can be utilized to construct the data-base for the spray and fuel-air mixing mechanism as a function of the flow characteristics.

주요기술용어 : DISI engine(직접분사식 가솔린 엔진), High Pressure Fan Spray Injector(고압 팬형 분사기), Wind tunnel(풍동), Crossflow(횡방향 유동), SMD (Sauter Mean Diameter, 사우터 평균입경)

1. 서 론

직접분사식 가솔린 엔진(DISI *engine*)은 기존의 PFI(Port Fuel Injection) 엔진보다 저공해, 저연비를 목표로 두고 계획된 엔진이다.[1] 직접분사식 가솔린 엔진에서는 실린더 안으로 직접 연료를 분사하기 때문에 연료의 분무과정과 주변 조건이 엔진성능의 중요한 요소이다.

직접분사식 가솔린 엔진용 분사기(injector)는 뛰어난 미립화 성능을 필요로 하는데, 미립화를 효율적으로 할 수 있고, 엔진의 전자식 제어가 가능해진 1990년대에 들어와서 본격적으로 연구되기 시작하였다. 많은 연구 결과로 인하여 고압 선회식 인젝터(high pressure swirl injector), 공기보조 분사기(air-assisted injector), 고압 팬형 인젝터(high pressure fan-spray injector) 등의 분사기가 선을 보였고, 많은 제품이 상용화되거나 연구되고 있다.[2]

직접분사식 가솔린 엔진에서 연료가 분사될 때의 분위기 조건으로 고압 환경에서의 연료 분사에 대하여 선행적으로 많은 연구가 있었다. 또한 실린더 내에서 변화하는 유동과 유속

* KAIST 기계공학과

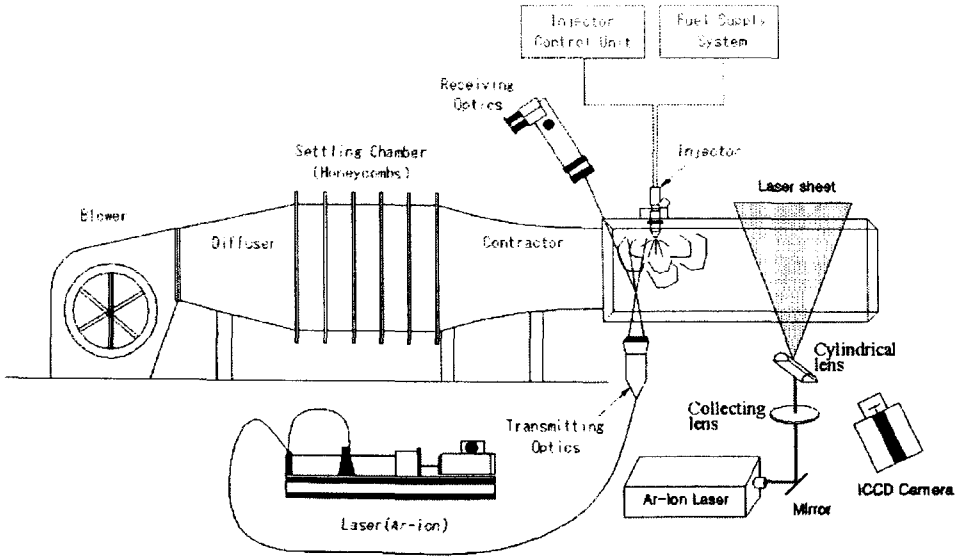


Fig. 1 Experimental setup

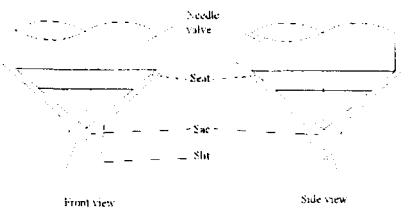


Fig. 2 Configuration of slit nozzle

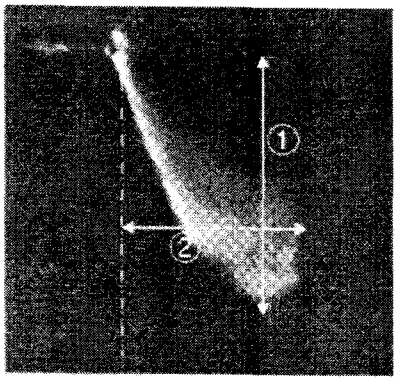


Fig. 3 Fan spray definition:① axial penetration ② radial penetration

에서 분무가 이루어지기 때문에 이것과 관련된 연구도 활발하다.[3~5] 본 논문은 직접분사식 가솔린 엔진에서 늦은 분사(late injection)가 이루어질 경우에 인젝터의 축과 실린더 내 유동 조건이 직각을 이루는 것을 생각하고 그 속도가 10m/s 내외라는 것을 생각하여 정상유동장치(wind tunnel)를 만들고, 수직으로 분사시켜 상호 작용을 관찰하였다.

2. 실험방법

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 풍동을 이용한 정상유동장치의 사용으로 단면적 200mm×200mm 내에서 균일한 1.5m/s~15m/s의 유동이 발생되도록 하였고, 측정위치는 아크릴로 제작해 가시화를 용이하게 하였다. 또한 가시화 부분의 하류 쪽에는 환기 시스템을 설치하여 분사된 연료가 잘 배출되도록 설계하였다. 대부분의 역텀블과 공기유도방식(air-guided system)을 이용한 직접분사식 가솔린 엔진에서 분사가 이루어질 때의 유동이 분무장과 주유동이 직각을 이루는 데에 착안하여 이 실험에서는 직접분사식 가솔린 엔진용

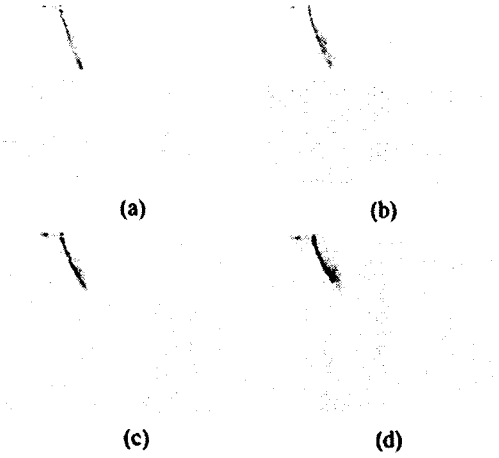


Fig. 4 Spray development at different crossflow velocities (injection pressure 9MPa, 1.2ms after SOI) (a) 1.5m/s (b) 5m/s (c) 10m/s (d) 15m/s

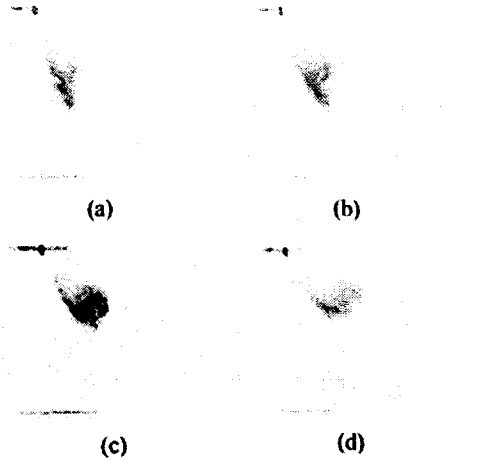


Fig. 5 Spray development at different crossflow velocities (injection pressure 9MPa, 4ms after SOI) (a) 1.5m/s (b) 5m/s (c) 10m/s (d) 15m/s

팬형 인젝터를 주유동(풍동 유동의 생성방향)에 수직하게 장착하였다. 역텀블을 이용한 직접분사식 가솔린 엔진에서 모터링시의 유동속도가 약 10m/s 전후인 점에 착안하여 주유동의 속도는 1.5m/s (ventilation only), 5m/s, 10m/s, 15m/s로 변화시키며 분무와의 관계를 살펴보았다.

분사기로는 고압의 연료를 사용하는 팬형 분사기를 사용하였다. 본 팬형 분사기의 대략적인 모양은 Fig. 2에 표현되어 있으며, 넓은 쪽으로(front view) 60° 폭으로 연료가 분출되도록 되어 있고 좁은 쪽으로는 축에서 15° 기울어져서 분사되도록 설계되어져 있다. 팬형 분사기에서 노즐 출구의 작은 쪽의 직경은 0.15mm이다. 분사압력은 9MPa로서 펌프를 이용하여 연료를 가압하였다. 연료로는 가솔린을 사용하였고, 실제의 4기통, 2L급 엔진에서의 중부하 조건에 해당하는 21mg의 연료를 분사하였다. 이미징(Mie 산란) 방법으로 측정한 본 실험에서 사용된 분사 시작시기와 분무 회로의 지연 시간은 0.39ms였다.

유동의 거시적인 관찰을 위하여 Mie 산란 방법을 사용하였다. 광원으로는 Spectra Physics 사의 6W Ar-ion 레이저를 사용하였고, 초점거리 1m의 볼록렌즈, 초점거리 7.5mm의 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 평면광을 만들어 분무의 중심 단면을 Stanford사의 ICCD 카메라로 1μs의 노출 시간을 주어 촬영하였다. 1μs 동안에는 100m/s로 움직이는 입자가 0.1mm 움직이므로 본 실험에 사용된 인젝터의 분무 특성상 분무 영상은 충분히 동결(freeze)되었다고 할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료분무 형상과 분무도달거리

Fig. 3은 본 논문에서 사용될 팬형 분사기 분무형태에 대한 정의이다. 노즐은 측정부위에 수직한 방향으로 장착되어 있고, 15° 각도로 하류쪽을 향하여 분사되고 있다. 본 실험에서 촬영한 사진은 모두 노즐의 얇은 쪽으로 분무되는 측면 사진임을 명시하는 바이다. 노즐로부터 노즐 방향(유동에 대한 수직방향)으로 도달한 거리를 축방향 도달거리(axial penetration)라고 정의하였고, 노즐로부터 유동 방향으로 도달한 거리를 반경방향 도달거리(radial penetration)라고 정의하였다.

Fig. 4~5는 횡방향 유동의 속도가 다를 때에 팬 스프레이의 특성이다. 이 그림을 보아서 두 가지를 생각할 수 있는데 첫째는 횡방향 유속이 빨라질수록 유동과 직각방향의 도달거리가 짧아지는 점, 둘째는 횡방향 유속이 빨라질수록 유동방향으로의 도달거리가 길어지는 점을 관찰할 수 있다. 이것은 분무 끝단의 액적들이 유동에 노출되는 시간이 길어지면서 작은

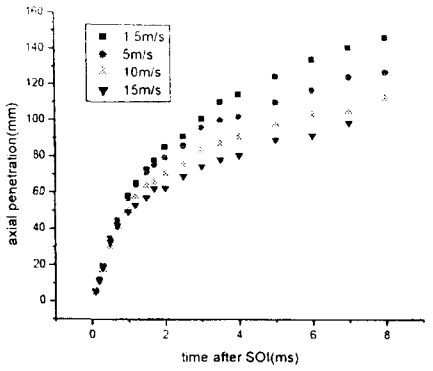


Fig. 6 Axial penetration with variable flow velocity

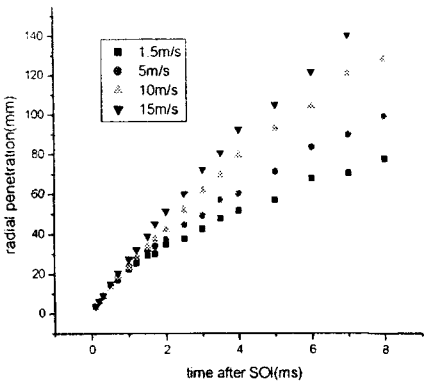


Fig. 7 Radial penetration with variable flow velocity

액적들의 증발이 활발히 일어나기 때문이다. 이러한 작은 액적들의 증발은 평균 입경이 감소하게 만들면서 SMD의 증가를 가져올 수 있다. 또한, 횡방향 유속이 빠를수록 분무장이 유동쪽으로 더 잘 이동하고, 이동한 분무장이 둥그스름해지는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 횡방향 유속으로 인하여 와(vortex)가 생성되기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 5의 분사후 4ms 때의 사진을 보면 횡방향 유속 1.5m/s일때를 제외하면 모든 조건에서 분무장이 둥근 모양을 하고 있는 것을 알 수 있다. 또, 분사후 4ms, 횡방향 유속 10m/s 일 때에는 사진에서 진한 부분(미산란 강도가 강한 부분)이 분무장의 끝자락보다 위쪽에 위치하는 것으로 보아서 와가 생성되고 있다는 증거를 뒷받침한다.

미 산란 사진을 토대로 팬형 분사기에서 수행된 분무의 도달거리를 측정하였다. Fig. 6~7에는 직접분사식 가솔린 엔진용 팬형 분사기에서 횡방향으로 흐르는 유동장내에서 축(axial)방향과 반경(radial)방향으로의 도달거리가 그래프로 나와 있다. 여기에서는 횡방향 유속을 다르게 하면서 실험을 하였다. 두 개의 그래프에서 횡방향 유속에 따른 도달거리의 시간에 따른 변화가 뚜렷이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 횡방향 유속과 수직방향인 축방향 도달거리에서는 분사시작 후 시간이 지날수록 횡방향 유속이 빠른 쪽의 도달거리가 짧은 것으로 나타났으며, 횡방향 유속과 같은 방향인 반경방향 도달거리에서는 횡방향 유속이 빠를수록 도달거리가 길어짐을 관찰할 수 있다. 횡방향 유속과 같은 방향인 반경방향 도달거리를 나타내어 주는 Fig. 7에서는 연료액적, 입자가 정상유동인 횡방향 유속을 추종하기 때문에 횡방향 유속이 빠를수록 그 추종속도도 빨라져서 도달거리가 길어지는 것은 당연한 일이다. 한편, 횡방향 유속과 수직방향인 축방향 도달거리 쪽은 횡방향 유속이 빨라지면서 횡방향 유동이 연료분무의 축방향 진행을 방해하는 동시에 분무 끝단의 증발현상과 분무 끝단이 접히는 현상, 즉 와(vortex)가 발생함으로써 도달거리가 짧아진다는 것을 앞서 언급하였다.

3.2 연료입경 측정과 평가

PDA(phase Doppler anemometry) 장치를 사용하여 가솔린 직접분사식 엔진용 분사기에서 분무되는 연료 액적의 크기를 측정하였다. Fig. 8에서는 본 실험에서 수행된 PDA 측정이 이루어진 점들을 표시하고 있다. 선행연구자들[6]은 연료 액적 미립화의 측정기준으로 노즐 아래쪽으로 3cm나 5cm의 수평선상에서의 평균을 사용하지만 본 실험에서는 노즐 팁으로부터 하류방향으로 5cm 떨어진 지점에서 유동과 수직한 방향으로 측정을 하였다. 본 측정선은 횡방향으로 이동하는 유동의 영향을 알아보기 위하여 채택되었고, 본 실험의 목적에 부합한다. 노즐 팁으로부터 하류방향으로 5cm 지난 지점에서는 횡방향 유속이 없다면 모든 분무장이 측정선 안에 들어가지 못한다. 본 실험에서 관찰한 바로는 횡방향 유속 5m/s, 10m/s, 15m/s에서는 거의 모든 입자가 본 측정선을 한 번씩 통과하

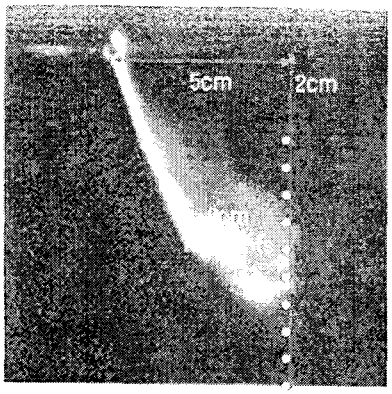
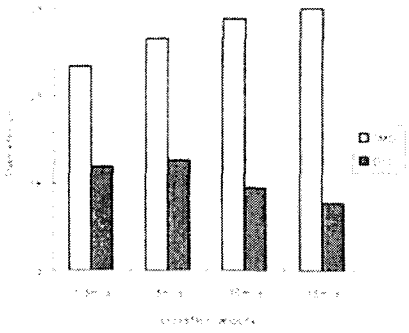


Fig. 8 Test points at PDA experiment

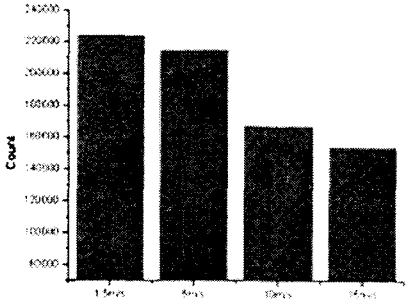
도록 되어 있었고, 횡방향 유속 1.5m/s일 때에는 본 측정선을 통과하지 않고 아래로 지나가거나 측정부 아래쪽 아크릴 표면에 충돌하는 경우도 있었다. 앞에서도 밝힌 바 있지만, 본 실험은 엔진 내부의 유동을 모사하는 것이기 때문에 10m/s를 중심으로 횡방향 유속이 더 빠를 때와 더 느릴 때를 실험한 것이기 때문에 횡방향 유속 1.5m/s인 것은 기준이 된다는 것 외에는 많은 물리적 의미를 가지지 않으므로 횡방향 유속이 1.5m/s일 때에 연료 액적이 모두 측정선을 통과하지 않는 효과는 무시하기로 하였다.

주유동 속도의 영향을 관찰해 보면 선회 분사기의 경우[7]와 마찬가지로 빠른 주유동의 속도는 SMD의 증가를 가져왔으며, Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 평균값인 D_{10}의 값은 감소하였고, Fig. 9(b)에서와 같이 측정된 데이터 개수도 감소하였다. Fig. 10은 측정된 모든 데이터를 모아서 나타낸 결과이다. 이 그래프의 세로축에는 확률밀도함수(Probability density function ; PDF)가 사용되었다. PDF 그래프는 측정대상 구간(block)에서 단위 구간을 정해놓고 그 구간에 있는 데이터의 개수가 총 데이터 개수에 대하여 차지하는 비(ratio)를 그래프상에 표시한 것이다. 본 그래프에 표시된 구간의 크기는 1㎛ 이다. Fig. 10(a)에서의 PDF 그래프에서 보면 주유동의 속도가 빠를수록 입경이 작은 입자들의 개수가 늘어나는 것을 관찰할 수 있고, 그래프가 왼쪽으로 치우쳐져서 선회 분사기의 경우와 마찬가지로 평균입경(D_{10})이 작아진다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9(a)에서 거의 모든 조건에 대하여 횡방향유속의 속도가 빠르게 될수록 SMD(Sauter



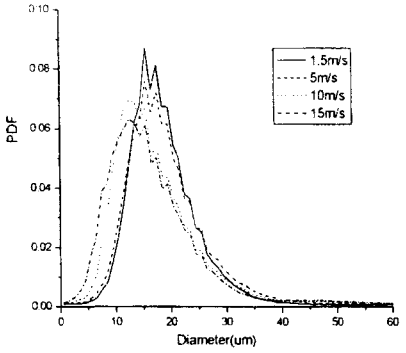
(a) SMD and D_{10}



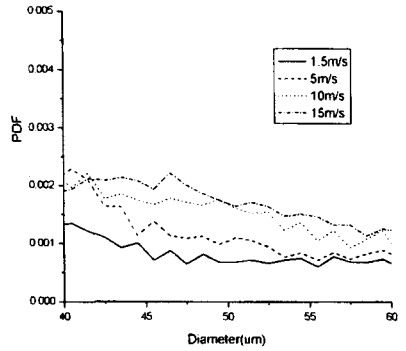
(b) Data counts

Fig. 9 Averaged droplet diameters and total counts of data ; (a) Mean droplet sizes, (b) Data counts

mean diameter)가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 액체 연료 입자가 존재하고 유동과 입자의 속도가 존재하기 때문에 웨버수(Weber number)를 적용할 수 있는데, 일반적으로 웨버수가 7.5 이하일 때, 웨버수가 클수록 입자끼리 부딪쳐서 반발해 튕겨져 나갈 확률보다는 합착할 확률이 커지는 것으로 알려져 있는데[8], 20㎛의 입자가 본 실험에서 수행된 1.5m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s의 속도에 노출되었을 때의 웨버수는 각각 0.002, 0.027, 0.110, 0.246으로서, 분무장의 조건이 같기 때문에 주유동의 영향만을 고려한다면 횡방향 유속이 클수록 웨버수가 커지지만, 절대적인 웨버수는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이로부터 본 실험에서 수행한 속도 범위 내에서는 풍동의 유속, 즉 주유동이 빠를수록 합착(coalescence)될 확률이 크다고 할 수 있다. 본 실험의 조건에서는 웨버수로 보았을 때에 횡방향 유속이 빨라짐에 따라서 분무 액적의 2차 분열(secondary break-up)이 일어나지는 않지만, 연료 액적의 증발과 합착이 진행된다는 것을 알 수 있다. 연료 액적의



(a)



(b)

Fig. 10 Droplet size distribution by PDF graph (a) Droplet size distribution (b) Magnified graph at large size block

증발은 D_{10}을 작게 만들고 연료 액적의 합착은 SMD를 크게 만든다. 또한 증발의 경우에는 증발이 연료 액적의 표면적과 관계하여 일어나므로 작은 액적의 경우에 큰 액적보다 훨씬 빠른 속도로 증발이 일어나게 되어 증발의 영향으로 큰 액적들은 직경의 변화를 많이 보이지 않고, 작은 액적으로 갈수록 증발의 영향을 받아서 직경이 더 많이 작아질 수 있는데, 이것 또한 SMD 증가의 원인이 된다. 또한 연료 액적의 합착의 경우에는 D_{10}의 수치보다는 SMD에 많은 영향을 준다. 따라서, 횡방향 유속이 빨라짐에 따라서 SMD는 증가하는 경향을 보이나, D_{10}은 연료 액적의 증발의 영향을 더 많이 받아 감소하는 경향을 보이는 것이 Fig. 9(a)를 통하여 증명된다. 또한 연료 액적의 증발로 인하여 Fig. 9(b)의 데이터 개수가 횡방향 유속이 빨라질수록 감소하는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)의 PDF 그래프의 입경이 큰 부분, 즉, 40㎛~60㎛ 부분을 확대하여 그린 그래프이다. 앞에서도 설명하였듯이 횡방향 유속이 커질수록 작은 입자의 증발 현상과 입자들의 합착 현상이 진행되어 큰 입자가 차지하는 비중이 커지는 것을 이 그래프로 증명할 수 있다.

4. 결론

직접분사식 가솔린 엔진(DISI engine)에서 늦은 분무(late injection)시 연료분무장과 실린더 내부 유동의 상호작용을 관찰하고자 직접분사식 가솔린 엔진용 분사기 중 고압 팬형 분사기에 대하여 정상유동장치(wind tunnel) 내에서 유동장의 속도를 바꾸며 분무를 행하고 유동장과 연료 분무와의 관계를 관찰한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 횡방향 유속이 빨라질수록 축방향 도달거리는 줄어들고 반경방향 도달거리는 늘어났다. 이것은 횡방향 유속으로 인한 증발 현상의 심화와 횡방향 유동과 분무장의 상호 작용으로 인하여 분사기 축방향 쪽의 모멘텀이 방해를 받아 분무 끝단이 원운동을 그리며 올라가서 와(vortex)가 생성되기 때문이다.

(2) 횡방향 유속의 증가는 SMD의 증가를 가져왔고, 평균입경인 D_{10}이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 PDA 측정 데이터 개수는 감소하였다. 이것은 횡방향 유속으로 인한 작은 입자들의 증발현상과 합착현상 때문에 횡방향 유속이 증가할수록 큰 입자가 차지하는 비중이 늘어났기 때문이다.

후기

본 연구는 과학재단의 우수연구센터(ERC) 및 국가지정 연구실 사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) F. Zhao, M. C. Lai, D. L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct-injection Gasoline Engines", Progress in

Energy and Combustion Science, pp. 437~562, 1999

(2) Y. Tanaka, T. Takano, H. Sami, K. Sakai and N. Osumi, "Analysis on Behaviors of Swirl Nozzle Spray and Slit Nozzle Spray in Relation to DI Gasoline Combustion", SAE paper no. 2003-01-0058, 2003

(3) J. Choi, S. Lee, H. Shin and C. Bae, "Spray and Flow-Field Interaction of Gasoline Direct Injection", Atomization and Sprays, vol.14, No.2, 2004

(4) Liu, R. L., Liu, W. Q., Wu, L. Q., Zhao, C. L., "LDV Measurements of Velocities and Turbulence Intensities in a Production SI Engine Under Motored and Firing Condition", SAE Paper No. 1999-01-0955, 1999

(5) E. Karaiskos, C. Arcoumanis, T. Hale, "Flow and Spray Investigation in Direct Injection Gasoline Engines", SAE paper No. 2002-01-0832, 2002

(6) VanDerWege, B. A. and Hochgreb, S., "Effects of FuelVolatility and Operating Conditions on Fuel Sprays in DISI Engines: (2) PDPA Investigation", SAE paper no. 2000-01-0536, 2000

(7) 최재준, 이용석, 최욱, 배충식, "횡방향 유속 변화에 따른 고압 가솔린 스월 인젝터의 분무 특성," 한국자동차공학회 논문집, Vol. 13, No. 1, pp1-8, 2005.

(8) Bayvel, L. and Orzechowski, Z., "Liquid Atomization", Taylor & Francis press, 1993