

## 횡단공기류에서의 고압 가솔린 분사시 연료분무 특성

### Fuel-Spray Characteristics of High Pressure Gasoline Injection in Cross Flows

이석환\*, 최재준\*, 김성수\*\*, 이상용\*, 배충식\*  
Seokhwan Lee, Jaejoon Choi, Sungsoo Kim, Sangyong Lee, 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 by the high pressure injector is of paramount importance in DISI(Direct Injection Spark Ignition) engines in that the primary atomization process must meet the requirement of quick and complete evaporation, mixing with air and combustion especially to prohibit the excessive HC emissions. 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 and shadowgraph images presented the macroscopic view of the liquid sprays and vapor fields. The velocity and particle size of fuel droplets were investigated by phase doppler anemometer(PDA) system. The processes of atomization and evaporation with a DISI injector were observed and consequently utilized to construct the data-base for the spray and fuel-air mixing mechanism as a function of the flow characteristics.

주요기술용어 : DISI engine(가솔린 직접 분사식 엔진), Wind tunnel(정상유동장치), Late injection(늦은 분사), Crossflow(횡방향유동), Shadowgraph(쉐도우 기법), PDA(위상 도플러 속도계)

#### 1. 서론

온실 효과에 따른 지구 온난화 및 대기 오염 방지를 위해 저공해, 저연비 엔진의 개발이 필요한 실정이다. 이 두 조건을 충족시키려는 노력 중 하나가 실린더 안에 연료를 직접 분사해 공해와 연비를 개선해 보겠다는 가솔린 직접 분사식(Direct Injection Spark Ignition; DISI) 엔진이다. DISI 엔진은 연료 경제성과 과도 응답성이 매우

좋으므로 앞으로 포트 분사식 엔진을 대체하는 차세대 자동차 엔진으로서 그 중요성 및 적용 범위가 갈수록 광범위해질 것으로 예상된다.<sup>1)</sup> DISI 엔진의 연소 시스템 최적화를 위해서 실린더내의 공기 유동과 관련한 연료 분사, 분무장의 미립화, 기화현상과 혼합기 형성 등의 과정이 연구되어져 왔다.<sup>2)</sup> DISI 엔진에서 성층연소가 수행될 때 연료는 압축 행정 말기에 분사되어지는 데,<sup>3,4)</sup> 분사가 시작될 때 실린더 내 유동의 평균 속도가 최대 15m/s 정도라는 것이 밝혀진 바 있다.<sup>5)</sup> 이를 토대로 본 연구에서는 정상유동장치

\* 회원, KAIST 기계공학과

\*\* 회원, 신라대학교 자동차공학과

에서 발생하는 빠른 유동과 분무장과의 상호 작용을 관찰함으로써, DISI 엔진에서의 성층화 연소과정을 위한 혼합기 형성 기구를 파악할 수 있으며, 흡기계 및 연소실 최적 설계를 할 수 있는 기초 자료를 구축하고자 하였다. 미산란 이미지 기법과 쉐도우 이미지 기법을 이용하여 액상과기상의 거시적인 분무 특성을 측정하였고, 위상도플러 속도계를 이용하여 미시적인 특성인 액적의 속도와 입경의 크기를 측정하였다.<sup>6,7)</sup>

## 2. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 횡방향 유동을 생성하는 정상유동장치와 측정 장치들을 나타낸 그림이다. 풍동의 최대 유속은 17m/s이고, 송풍기(blower)의 모터 속도를 제어하여 풍속의 세기를 조절하며, 균일한 유동이 되도록 제작하였다. 시험부(test-section)는 단면적이 200×200mm인 투명한 아크릴을 사용하여 광학적 접근이 가능하게 하였다. 만일, 단면적의 크기가 200×200mm보다 작게 되면 시험부의 밑부분에 연료가 닿는 연료증착(wetting) 현상이 일어나게 된다. 이러한 현상이 일어나게 되면 본 연구에서 원래 목적인 횡방향 유동의 영향에 따른 분무장

의 변화를 관찰하기가 힘들어지게 된다.

유동에 직각 방향으로 분사되는 가솔린 연료 분무와 정상 유동간의 상호 작용의 거시적인 관찰을 위하여 평면광(sheet beam)을 이용한 미산란기법(Mie scattering imaging technique)과 쉐도우우 기법(Shadowgraph imaging technique)이 사용되었다. 광원은 0.75W의 수냉식 Ar-Ion 레이저가 사용되었고 미산란 실험에서는 초점거리 6.5mm의 원통형 렌즈(cylindrical lens)와 초점거리 1m인 렌즈를 사용하여 평면광을 만들어 중심단면의 액상연료 가시화를 하였고, 쉐도우 실험에서는 직경 200mm, 초점거리 2m인 오목거울 2개를 사용하여 평행광을 만들어서 ICCD 카메라로 노출시간 10μs 동안 촬영하였다.

위상도플러 속도계(PDA)를 사용하여 분무되는 연료의 속도와 평균입경을 측정하였다. Table 1은 PDA 측정을 하기 위한 각종 광학 설치인자를 나타낸 것이다.

분사기로는 초기 분사각이 60°이고 오리피스(Orifice)의 지름이 0.6mm인 핀 형태의 밸브를 가지는 DISI용 고압 선회식 분사기(High Pressure Swirl Injector)를 사용하였다. 분사기는 횡방향 유동에 직각으로 설치하였으며, 분사기 노즐의 끝은 시험부 윗벽에서 8mm 아래에 위치하도록

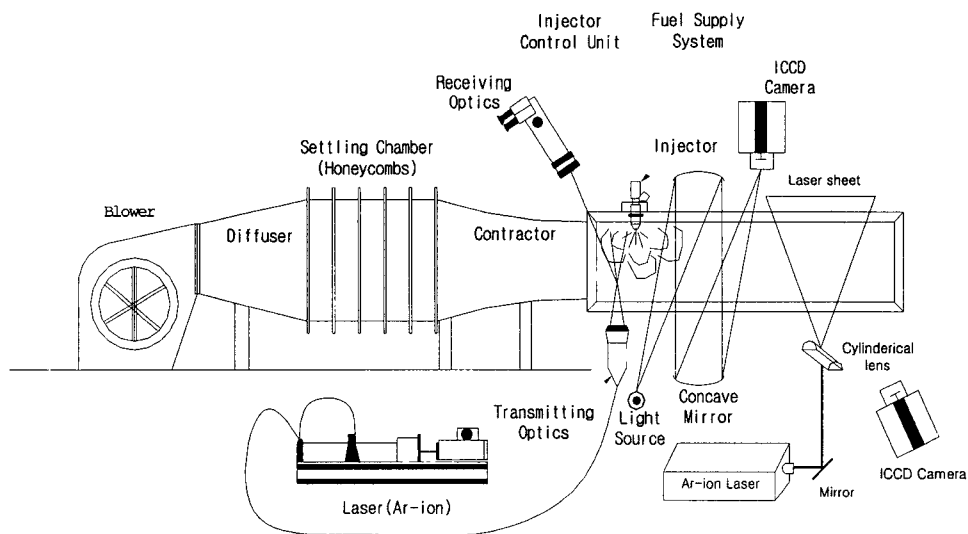


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 PDA system setup parameters

Laser wavelength	514.5nm
Transmitter focal length	362.6mm
Beam spacing at transmitter	50mm
Receiving lens focal length	300mm
Scattering angle	30°
Vol. Diameter	90.5 μm
Vol. Length	1.31mm

Table 2 Weight of fuel as a function of injection pressure

Injection pressure	Weight of fuel per injection
3MPa	32.44mg
5 MPa	41.35mg
7 MPa	47.87mg

설치하였다. 분사 압력은 3MPa, 5MPa, 7MPa로 변화시키면서 실험을 하였고, 횡방향 유속은 0 m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s로 바꾸며 실험을 하였으며, 분사기의 분사 시간은 5ms로 고정하였다. Table 2는 분사 압력에 따라 분사기에서 한번에 분사되는 연료의 양을 나타낸 것이다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 거시적 분무형상

Fig. 2는 분사 압력을 변화시키면서 얻은 미산란 이미지이다. 모든 이미지에서 색(sac) 볼륨에 의해서 생기는 액적 크기가 큰 솔리드 제트(solid jet) 부분이 관찰된다. 이 현상은 밸브가 편타입인 분사기에서 생기는 일반적인 현상으로 선회기(swirler)와 니들(needle) 사이에서 생긴 색 볼륨이 충분한 속도를 가지지 못하고 분사될 때 생기는 것이다. 이 솔리드 제트는 실린더와 피스톤 보울(Bowl)에서 연료증착 현상을 일으키게 되고 결과적으로 미연탄화수소(UHC; Unburned Hydrocarbon)를 배출하는 직접적인 원인이 된

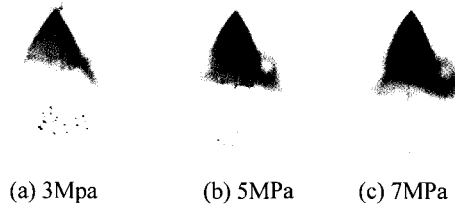


Fig. 2 The spray shape at different injection pressures (Mie scattering image, Quiescent, 2.5ms after SOI)

다. 분사 압력이 높을수록 더 많은 연료가 분사되어 미산란 강도가 더 강해지고, 분무장이 중공 원추(hollow cone) 형태에서 솔리드 콘(solid cone) 형태로 변하는 것을 관찰할 수 있다. 분사 압이 높아지게 되면 연료 분무 외곽의 자유 경계면에서 스트레인(strain) 비율이 증가하면서 이로 인한 항력의 증가로 도너츠형 와류(toroidal vortex)의 형성이 일어나게 된다. 이러한 도너츠형 와류는 중공 원추 형태의 분무장 중앙에 형성되는 저압 부분에 주변 공기가 유입되는 과정에서 생성되는데, 이러한 공기의 유입은 분무장 외곽 쪽의 작은 액적들의 방향을 중심부로 바꿈으로써 솔리드 콘 형태의 분무장을 형성하게 된다.<sup>3,8)</sup>

침투 깊이(penetration)를 설명하기 위해 Fig. 3에서 분무장 형상을 정의하였다. 초기에 나오는 솔리드 제트의 침투 깊이는 엔진내의 연료증착 현상과 매우 밀접한 관련이 있고 main jet 침투 깊이는 관심 있는 영역인 볼텍스 유동이 있는 부분을 나타내므로 두 경우로 나누어서 정의하였다. 그리고, 두 경우를 정하여서 횡방향 유동 속도에

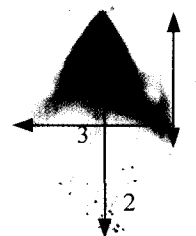
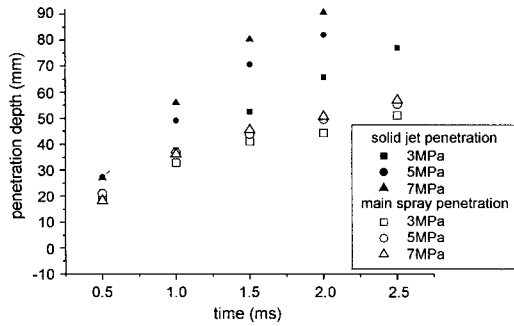
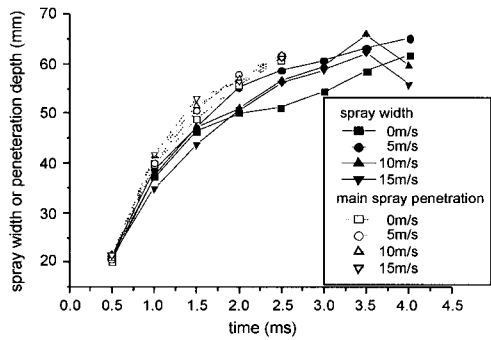


Fig. 3 Definitions of spray geometry : 1. main spray penetration 2. solid jet or tip penetration 3. spray width



(a)



(b)

Fig. 4 Measurement of spray penetrations and width, (a) solid jet & main spray penetration at various injector pressures (b) spray width & main spray penetration at various crossflow velocities

따른 분무장 폭을 구할 수 있었다. 분무장의 침투 깊이와 분무장 폭은 미 산란 이미지에서 구하였다. Fig. 4는 분사 압력과 횡방향 유동의 속도 변화에 따른 분무장의 주요 거리를 나타낸 것이다. 분사 압력이 증가하면 시간의 증가에 따라서 선단 침투 깊이도 증가함을 알 수 있다. 그러나, 주분무장 침투 깊이는 압력의 증가에 따른 영향이 거의 없었다. Fig. 4(b)는 분사 압력이 5MPa인 경우에서의 침투 깊이와 분무장 폭을 나타낸 그래프이다. 분무장 폭은 횡방향 유동의 속도에 관계없이 거의 일정하였고, 주분무장 침투 깊이도 동일한 경향을 보였다. 오히려 횡방향 유동의 속도가 커지면, 분사 후 3.5ms 후에는 분무장 폭은 줄어들게 된다. 이는 유동장과의 빠른 기화현상 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2 속도에 따른 연료분무 발달 - 중앙 종단면

Fig. 5와 Fig. 6은 분사압력을 5MPa로 고정시키고, 횡방향 유동의 속도를 0m/s, 15m/s로 변화시키며 촬영한 미 산란 이미지이다. 횡방향 유동

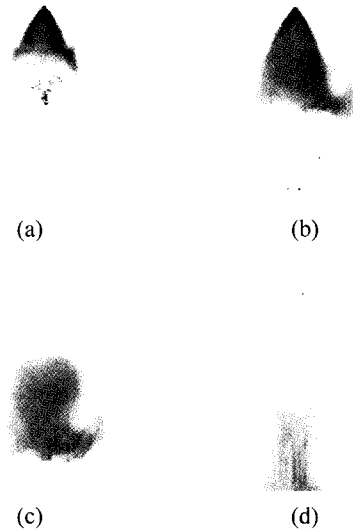


Fig. 5 Spray developments at Quiescent condition(Mie scattering image, injector pressure 5MPa), (a) 1ms (b) 3ms (c) 5ms (d) 7ms after SOI

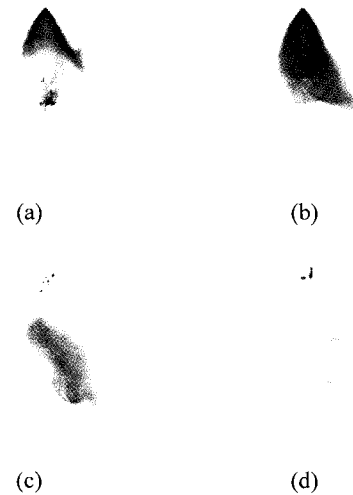


Fig. 6 Spray developments at crossflow velocity 15m/s (Mie scattering image, injector pressure 5MPa), (a) 1ms (b) 3ms (c) 5ms (d) 7ms after SOI

이 15m/s의 경우를 살펴보면, 초기(분사 후 1ms)부터 불텍스 유동을 살펴 볼 수 있지만 분사 후 3ms, 5ms에서는 불텍스 유동을 관찰하기가 힘들었다. 하지만, 분사 후 7ms에서의 이미지를 보면 불텍스 유동이 아직 남아서 전체 유동을 지배하고 있었으며, Fig. 6(d)에서는 왼쪽에 있던 불텍스가 빠르게 횡방향 유동쪽으로 이동하여 오른쪽 불텍스와 8자 모양을 이루며 진행하는 것을 알 수 있다. 횡방향 유동이 없는 경우에는 시간의 증가에 따른 모든 경우에서 불텍스 유동을 뚜렷이 살펴볼 수 있다. 여기서 불텍스 유동이란 분무장의 자유 경계면 하류 끝단에 존재하고 주분무장과 역방향의 속도를 가지면서 말려들어가는 모양을 가지는 유동이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 횡방향 유동의 속도가 0m/s, 15m/s일 때의 쉐도우 이미지를 나타낸 것이다. 미 산란 이미지에서처럼 불텍스 유동을 잘 구별하기는 힘들지만, 액상의 연료 거동과 함께 기상의 연료 거동도 살펴볼 수 있다. 분사 후 3ms에서부터 불텍스 유동의 끝부분에서 기화현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 분사 후 7ms의 미 산

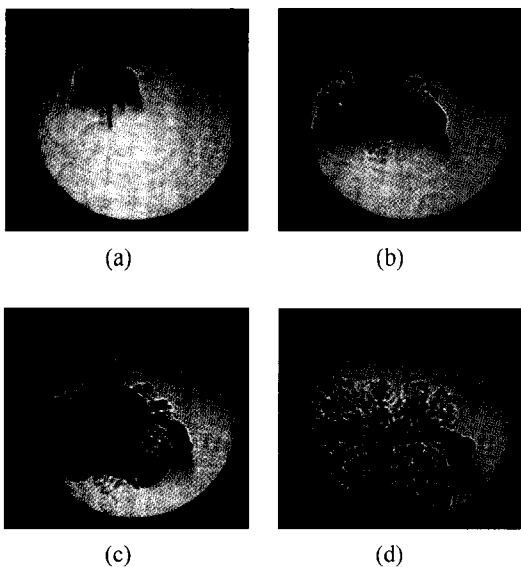


Fig. 7 Spray development at quiescent condition(Shadow-graph image, injector pressure 5MPa), (a) 1ms (b) 3ms (c) 5ms (d) 7ms after SOI

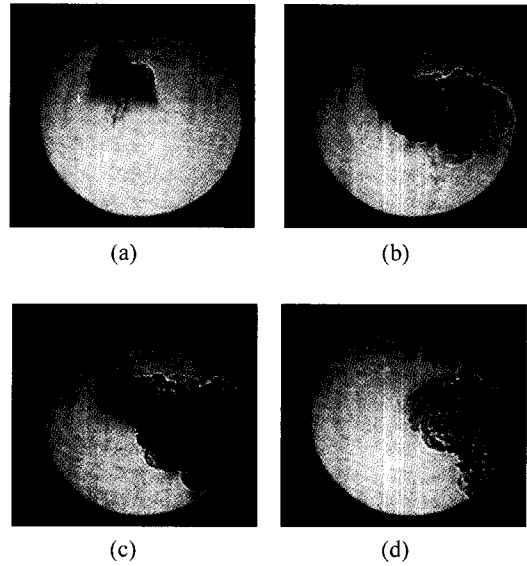


Fig. 8 Spray development at crossflow velocity 15m/s (Shadowgraph image, injector pressure 5MPa), (a) 1ms (b) 3ms (c) 5ms (d) 7ms after SOI

란 이미지에서는 이미지의 강도가 약해지는 것을 알 수 있었는데, 같은 시간의 쉐도우 이미지에서는 기화된 연료가 불텍스 유동을 가지면서 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 횡방향 유동의 속도가 높을수록 불텍스 유동의 생성 과정을 더 쉽게 관찰할 수 있다. 또한, 횡방향 유동의 속도가 더 높아지면 유동이 없을 때 보다 기상 연료의 양이 많아지는 것으로 보아 기화 현상이 더 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다. 기화된 연료는 액상의 연료보다 밀도가 작기 때문에 횡방향 유동의 방향으로 빠르게 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 분사 압력이 5MPa일 때 횡방향 유동의 속도를 0m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s로 바꾸어 가면서 촬영한 분사 후 4ms에서의 쉐도우 이미지이다. 횡방향 유동의 속도가 증가하면 액상의 연료와 기화된 연료가 동시에 횡방향 유동의 영향을 받아서 이동하게 된다. 분무장 끝단에 생기는 불텍스 유동은 횡방향 유동의 속도가 느릴 때 더 관찰하기가 쉬우나, 횡방향 유동이 빠르더라도 존재하며 기화와 혼합과정을 진행하고 있음을

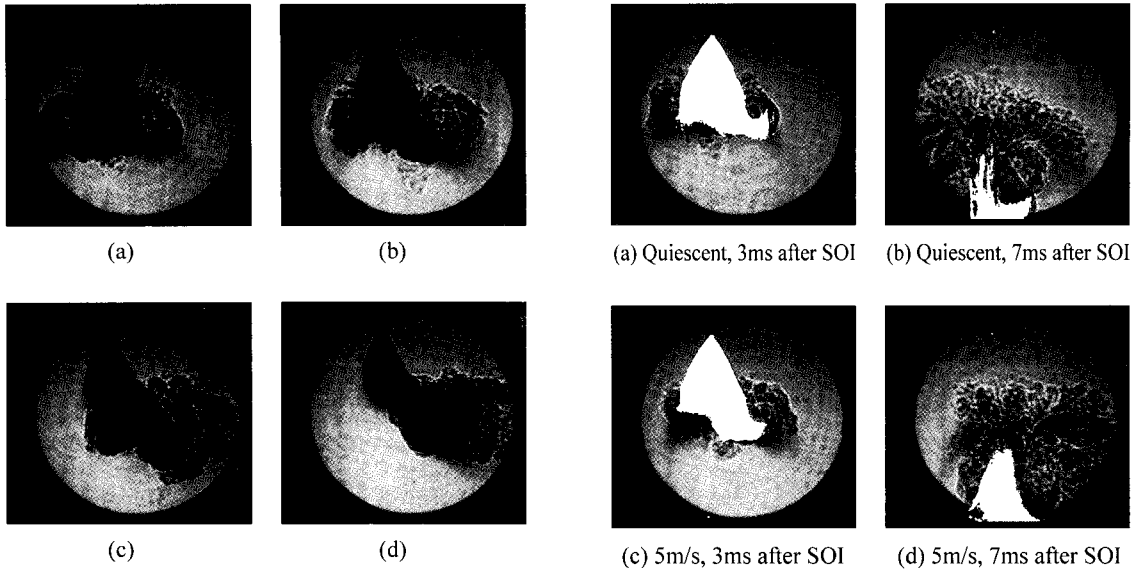


Fig. 9 Spray development to crossflow velocity(Shadow-graph image, injector pressure 5MPa, 4ms after SOI), (a) 0m/s (b) 5m/s (c) 10m/s (d) 15m/s

앞에서 주지한 바 있다.

Fig. 10은 쉐도우 이미지와 미 산란 이미지를 중첩한 것이다. 흰부분으로 나타나는 액상 연료의 미 산란 이미지를 쉐도우 이미지에 중첩시켜서 기상 연료만의 거동을 살펴 볼 수 있었다. 미 산란 이미지와 쉐도우 이미지에서 노출시간을 동일하게  $10\mu s$ 로 주었고 동일한 경계값으로 미 산란 이미지 처리를 하였기 때문에 서로 비교가 가능하다. 횡방향 유동의 속도가 증가할수록 기화 현상이 더 잘 일어나 그림에서 액상의 연료 부분을 나타내는 미 산란 이미지 부분이 줄어드는 것을 뚜렷이 관찰할 수 있다.

### 3.3 횡단면의 분무형상

Fig. 11은 분무장의 횡단면을 분사기 끝에서 50mm, 60mm 떨어진 곳에서 분사 후 4ms를 미 산란 기법으로 촬영한 이미지이다. 분사압력이 3MPa일 때의 이미지를 살펴보면 분무장 횡단면은 가운데가 비어 있는 것으로 보아 중공원추 형태를 이루고 있음을 알 수 있다. 분사압력이 증가하면 분무장은 최종적으로 솔리드 콘 형태로

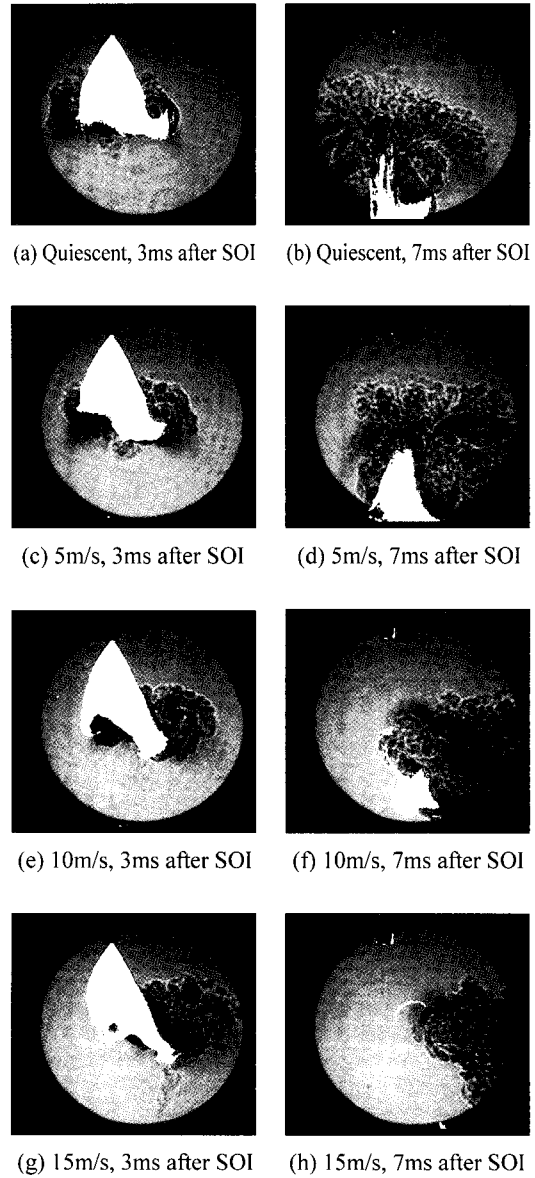


Fig. 10 The pure vapor images(overlapping of Mie scattering and Shadowgraph images)

바뀌어지게 되고, 분무장 횡단면의 외곽부는 더욱 불안정해지고 분무장이 미립화되면서 난류 유동을 일으켜 매우 불규칙한 분포를 이루게 된다.

Fig. 12는 분사압력이 5MPa이고 분사기 끝에서 50mm 떨어진 곳에서의 횡방향 유동 속도에 따른 분무장 이미지이고, 분사 후 4, 6, 8ms때의

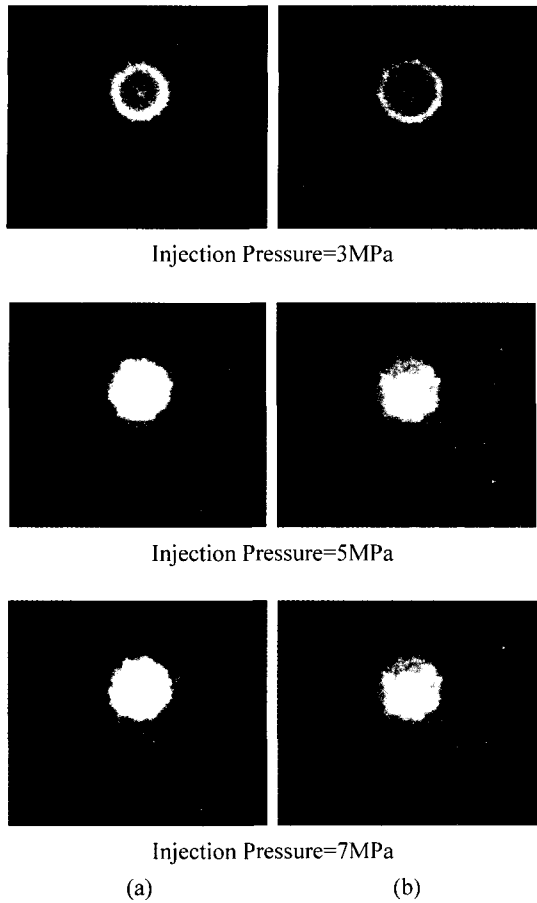


Fig. 11 Cross-section view of the spray structures at 4ms after the fuel injection start and the fuel injection pressure of 3, 5, 7MPa: (a) 50mm, (b) 60mm from the injector tip

이미지들을 보여주고 있다. 특히 분사 후 6, 8ms에서의 이미지들을 살펴보면 횡방향 유동의 속도가 증가함에 따라서 단면의 모양이 커지게 되고 단면에서의 미산란 강도가 달라지는 것을 알 수 있다. 단면에서 보면 윗부분이 아래부분에 비해서 밝은데 이것은 연료가 횡방향 유동에 의해서 기화가 되어서 아래로 이동하게 되는데 윗부분은 기상의 연료가 많이 존재하고 아래부분은 액상의 연료가 많이 존재하여 윗부분의 미산란 강도가 세게 나타난다. 분사기 끝에서 60mm 떨어진 곳에서의 실험결과도 동일하게 나타났다. 횡방향 유동 속도에 따른 분무장 횡단면 이미지

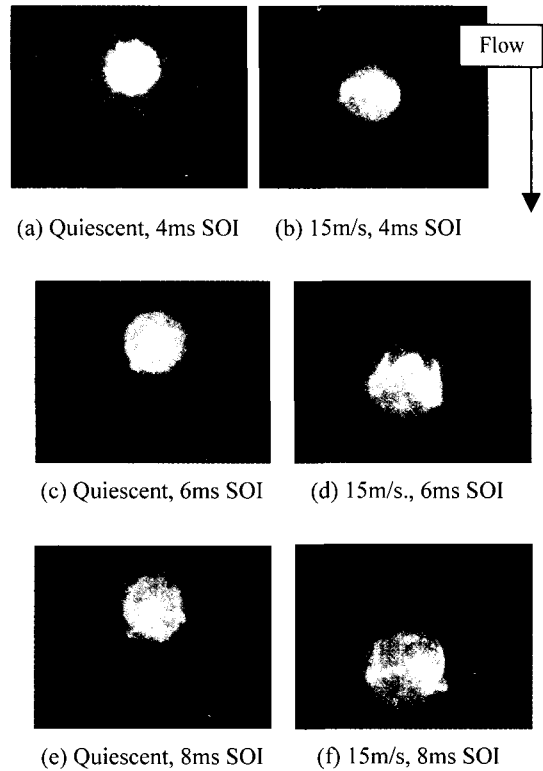


Fig. 12 Cross-section view of the spray structures at 4, 6, 8ms after the fuel injection start with fuel injection pressure 5MPa at 50mm from the tip

는 횡방향 유동에 따른 연료의 기화특성을 논의함에 있어서 매우 중요한 의미를 가진다. 이전 실험에서 미산란 이미지와 웨도우 이미지를 중첩하여 연료의 기화 정도에 대해서 살펴보았는데 횡방향 유동의 속도가 증가함에 따라서 액상부분의 면적이 줄면서 연료의 기화특성이 더 좋은 것으로 관찰된다. 그러나, 횡방향 유동에 의해 분무장 양단이 겹쳐지면서 종단면 이미지의 기화특성이 좋아진 것처럼 보일 가능성도 있기 때문에 단순히 종단면을 촬영한 중첩 이미지만으로는 기화 특성에 대해서 결론을 내리기 힘들 수도 있다. 위에서 살펴본 것과 같이, 추가로 분무장의 횡단면 이미지를 살펴보면 횡방향 유동의 증가에 따라서 분무장이 횡방향으로 이동할 뿐이지 분무장의 횡단면 형태는 원 모양으로 거의 동일하다. 이것으로 보아서 횡방향 유동 속도

의 증가에 따라서 연료의 기화현상이 촉진된다고 결론 내릴 수 있다.

### 3.4 중앙종단면에서 연료분무의 속도장 및 미립화 특성

Fig. 13은 횡방향 유동의 속도에 따른 분무장의 속도를 PDA 기법으로 측정하여 나타낸 것이다. 120mm×120mm의 공간에 대해서 144개의 측정점을 선택하였다. 각각의 경우 2개의 서로 다른 볼텍스 유동이 생성되어 있음을 알 수 있으며, 횡방향 유동의 속도가 증가하면 분무장이 그 방향으로 빠르게 진행함을 알 수 있다. 볼텍스 유동은 주유동에 비해서 그 크기가 작고 역방향의 속도 분포를 가진다. 그림을 살펴보면 서로 다른 세기를 가지는 두 개의 볼텍스 유동이 소멸되지 않고 움직이고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 볼텍스 유동은 강한 유동장이 생성되어 있는 경우에서도 공기 유입을 쉽게 하여 공기와 연료의 혼합을 쉽게 한다. 이러한 현상은 고압 선회식 분사기를 가지는 DISI 엔진에서 공기와 연료의 거동과 동일하다고 할 수 있다.

Fig. 14는 횡방향 유동 속도에 따른 입경 분포를 나타낸 것이다. 여기에 나타낸 결과들은 측정 위치에 따른 영향을 없애기 위하여 144개의 측정점에서 얻은 데이터를 모두 고려하여 구한 것이다. Fig. 14(a)는 횡방향 유동에 대해 PDA 실험에서 구해지는 입경 데이터 개수의 절대적인 수치(N)를 나타낸 것이다. 동일한 조건에서 각각의 횡방향 유동에 대해 1000번 분사하여 입경 데이터를 얻었으므로 절대적인 수치 비교가 가능하다. 횡방향 유속이 5m/s에서 15m/s로 증가하게 되면 PDA 측정기에서 측정되는 입경 데이터 개수가 같은 시간 동안 24% 정도로 급격하게 줄어든다. 기본적으로 PDA는 입자의 산란광에서 나오는 위상차와 주파수차로 액적의 입경과 속도를 구하는 원리이므로 연료가 기화가 되면 PDA 측정이 불가능한 상태가 되는 것이다. 그러므로 PDA 측정에서 입경 데이터의 양이 급격하게 줄어든다는 것은 연료의 기화현상이 일어나

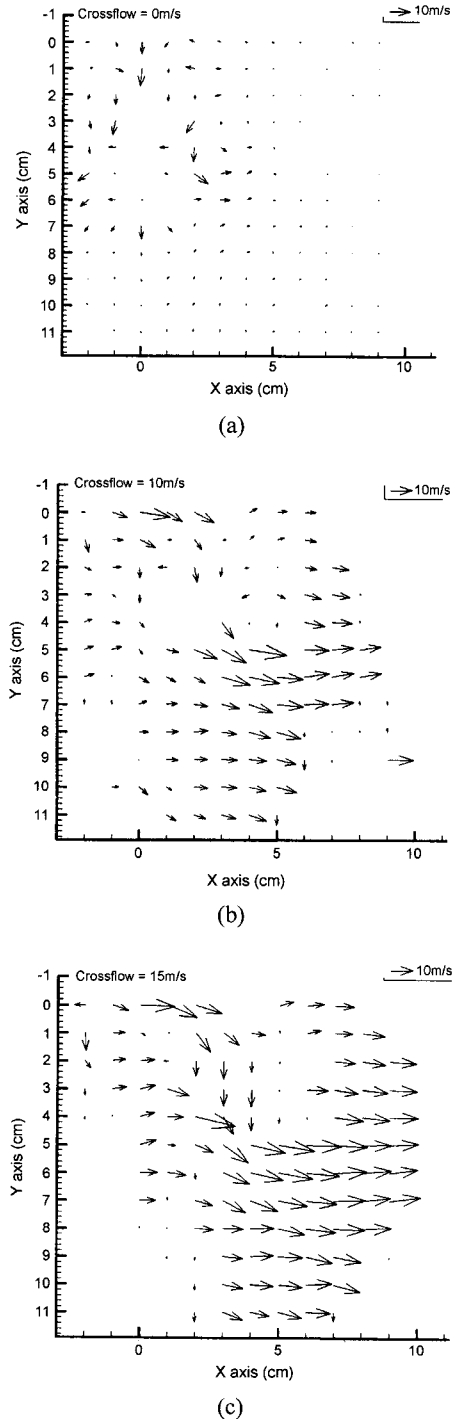
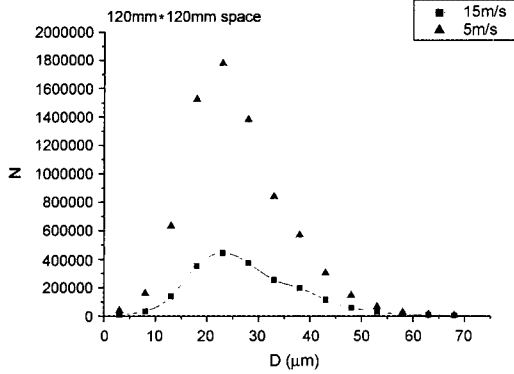
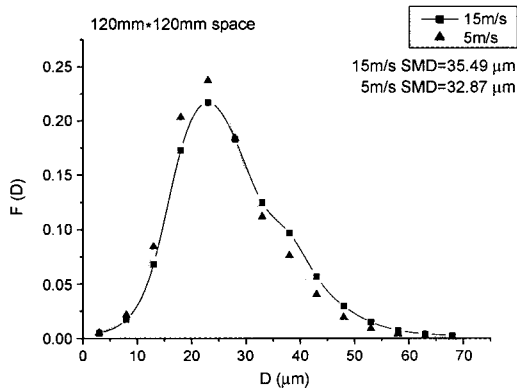


Fig. 13 Velocity vector at various crossflow velocity(5.5 ms after the fuel injection, Injection pressure=5 MPa): (a) Quiescent, (b) 10m/s, (c) 15m/s





(a) Absolute number of PDA size data



(b) Number probability density distribution of droplet size

Fig. 14 Droplet size distribution(120mm×120mm space)

서 액상의 연료가 급격하게 기상의 연료로 바뀐다는 것을 의미한다. 이전의 실험에서도 미산란 이미지와 웨도우 이미지를 비교함으로써 횡방향 유동이 증가하면 연료의 기화현상이 더 잘 일어난다는 것을 살펴볼 수가 있었는데 PDA 측정을 통해 다시 확인할 수 있었다. Fig. 14(b)는 각각의 측정선에서 횡방향 유동 속도의 변화에 따른 수확률 밀도 분포 곡선(F(D))을 나타내고 있다. 이 수치는 측정 공간에서 측정되는 입경 데이터를 모두 합해서 각각의 입경이 전체에서 얼마나 차지하는지를 파악하는 확률 분포이다. 그래프를 보면 횡방향 유동에 따른 정규 분포 곡선이 20~25 $\mu\text{m}$  사이에서 최대값을 이루고 있는데 횡방향 유동이 5m/s에서 15m/s로 커지게 되면 수확률 밀도 분포 곡선에서 최대값을 이루는 부

분의 확률 분포는 줄어들고 대신 액적의 크기가 큰 부분인 30 $\mu\text{m}$  이상의 영역에서는 확률 분포값이 늘어나는 것을 볼 수 있다. 횡방향 유동의 속도가 증가함에 따라 액적들의 기화현상이 촉진되어 작은 크기의 액적들이 증가해야 할 것 같지만, 이와 반대로 작은 액적들의 비율이 감소함을 알 수 있는데 이것은 횡방향 유동 속도의 증가에 따라서 작은 액적들은 증발이 빨리 되지만 큰 액적들은 상대적으로 증발이 늦어서 큰 액적들의 확률 분포값이 커지기 때문이다. 이로 인해 측정 공간에서의 SMD 값도 횡방향 유동의 속도가 증가하게 되면 커지게 된다. 또한, SMD 값을 비교해 보면 횡방향 유동의 속도가 15m/s일 때는 35.49 $\mu\text{m}$ , 5m/s일 때는 32.87 $\mu\text{m}$ 로 횡방향 유동의 속도가 증가할 때 SMD 값이 2.62 $\mu\text{m}$  정도 증가함을 확인하였다.

#### 4. 결론

유동과 분무장의 상호 관계를 살펴보기 위하여 15m/s 이상의 횡방향 유동에서 DISI용 고압 선회식 분사기에 대해서 연구하였다.

1) 선단 침투 거리는 분사 압력의 증가에 따라서 커지지만, 주분무장 침투 거리와 분무장 폭은 분사 압력과 횡방향 유동에 거의 영향을 받지 않았다.

2) 액상과 기상의 연료 거동은 미산란 이미지와 웨도우 이미지로 구별할 수 있었다.

3) 연료의 기화 특성 정도는 횡방향 유동의 속도에 비례한다. 즉, 횡방향 유동이 클수록 연료의 기화 현상이 촉진된다.

4) PDA 실험으로 획득한 속도 데이터에서는 각각의 횡방향 속도에서 서로 다른 두 개의 볼텍스 유동의 존재를 확인할 수 있었다. 이러한 볼텍스 유동은 강한 유동장에서도 공기의 유입을 가져와서 공기와 연료의 혼합을 수월하게 해준다.

5) PDA 실험으로 획득한 입경 측정 데이터에서 횡방향 유동의 증가에 따라서 기화 현상이 촉진된다는 것을 다시 한번 확인할 수 있었다.

6) 횡방향 유동의 속도가 증가하면 크기가 큰 액적보다 작은 액적들의 증발이 활발하게 이루어져 전체 분무장에서 큰 액적들이 차지하는 비율이 커지는 것으로 보이며, 이에 따라 SMD 값이 증가하게 된다.

## 후 기

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

- 1) H. Eichlseder, E. Baumann, P. Muller, S. Rubbert, "Gasoline Direct Injection - A Promising Engine Concept for Future Demands," SAE 2000-01-0248, 2000.
- 2) 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.
- 3) C. Preussner, C. Doring, S. Fehler, S. Kampmann, "GDI : Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance," SAE 980498, 1998.
- 4) W. Hentschel, A. Homburg, G. Ohmstede, "Investigation of Spray Formation of DI Gasoline Hollow-Cone Inside a Pressure Chamber and a Glass Ring Engine by Multiple Optical Technique," SAE 1999-01-3660, 1999.
- 5) R. L. Liu, W. Q. Liu, L. Q. Wu, C. L. Zhao, "LDV Measurements of Velocities and Turbulence Intensities in a Production SI Engine Under Motored and Firing Conditions," SAE 1999-01-0955, 1999.
- 6) T. Ozasa, K. Kozuka, T. Fujikawa, "Schlieren Observation of In-cylinder Phenomena Concerning a Direct-Injection Gasoline Engine," SAE 962696, 1996.
- 7) B. A. Vanderwege, S. Hochgreb, "Effects of Fuel Volatility and Operating Conditions on Fuel Spray in DISI Engines : (2) PDPA Investigation," SAE 2000-01-0536, 2000.
- 8) F. Q. Zhao, J. H. Yoo, Y. Liu, M. C. Lai, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE 961925, 1996.
- 9) J. J. Choi, S. H. Lee, H. D. Shin, C. S. Bae, "Fuel-Spray Characteristics of High Pressure Gasoline Injection in Flowing Fields," JSME International Journal, Vol.43, No.4, pp.576-581, November 2000.
- 10) 황순철, 최동석, 김덕출, "GDI 분무의 기·액상 분포를 통한 분무의 성장 특성," 한국자동차 공학회 논문집, 제9권 제2호, 2001.