

<논문> SAE NO. 2000-03-0111

## 직접 분사식 가솔린 엔진의 실린더 내 분무 유동 특성에 관한 연구

### In-cylinder Spray Flow Characteristics in Direct-injection Gasoline Engine

김진수\*, 전문수\*, 윤정의\*  
Jin-soo Kim, Mun-soo Chon, Jeong-eui Yun

#### ABSTRACT

In-cylinder spray flow motion plays an important role in the adjustment of mixture preparation with a fundamental spray characteristics and in-cylinder flow field as well in direct-injection gasoline engine. In this study, the fundamental spray characteristics such as mean drop size, velocity distribution, spray angle were measured and in-cylinder spray flow motion was visualized in order to optimize intake port, piston top land and combustion chamber shapes in the development stage of mass-produced GDI engine. For these experiments, the PDPA measurements and Mie scattering technique were used for detailed spray characteristics and in-cylinder spray motions were obtained by use of ICCD camera through the single-cylinder optical engine. From the experimental results, the test injector shows a good low-end linearity between the dynamic flow and fuel injection pulse width and the fuel spray of 20mm or less in SMD with good spray symmetry. In addition, the in-cylinder tumble flow has more effect on the homogeneous mixture formation than that of in-cylinder swirl flow at early injection mode and the in-cylinder swirl flow plays a better role of stratified mixture preparation than tumble flow at late injection mode.

주요기술용어 : Direct-injection gasoline engine(직접 분사식 가솔린 엔진), In-cylinder spray flow(실린더 내 분무 유동), Single cylinder optical engine(단기통 가시화 엔진)

#### 1. 서론

현재 대부분의 가솔린 기관에서 사용하고 있는 포트 분사식 기관은 연료를 흡기관 내에 분사하기 때문에 수송 지연이 생기며, 냉간 시동시 또는 과도 운전시 생기는 벽면 젖음

(wall wetting) 현상에 의해 정확한 공연비 제어가 어렵게 되어 초기 시동시 약 90초 동안 배출되는 미연 탄화수소의 양이 전체 배출량의 약 90%를 차지한다.<sup>1)</sup> 이에 반해 직접 분사식 가솔린 기관은 연소실 내에 연료를 직접 분사하기 때문에 수송 지연이 생기지 않으며, 벽면 젖음 현상이 감소되어 냉간 시동성 및

\* 회원, 대우자동차(주) 기술연구소

과도 응답성이 우수할 뿐만 아니라 연료의 증발 잠열에 의한 흡입 공기의 냉각 효과를 갖고 있기 때문에 열효율 및 체적 효율이 향상되는 장점을 가지고 있다.<sup>24)</sup>

이와 같은 직접 분사식 가솔린 기관은 연비 모드인 부분 부하 영역에서는 성층화 연소에 의한 초회박 연소가 가능하기 때문에 유해 배기 가스의 저감 및 열효율 향상을 실현할 수 있으며, 출력 모드인 전부하 영역에서는 이론 공연비에 의한 고출력을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 직접 분사식 가솔린 기관에서는 실린더 내에 분사된 연료 입자의 증발 시간이 포트 분사식에 비하여 상대적으로 짧기 때문에 연료 입자가 증발하기 위해서는 미립화가 효과적으로 이루어져야 한다.<sup>5)</sup> 또한 피스톤 상단이나 연소실 벽면에 형성되는 벽면 젖음 현상에 의한 미연탄화수소의 발생을 억제함과 동시에 연비 모드 및 출력 모드에서 각각 성층화 혼합기와 균일 혼합기를 만들어주는 혼합기 제어 기술이 확립되어야 한다.<sup>6)</sup>

따라서 본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 기관의 혼합기 제어 기술을 확립하고 이를 엔진 설계에 적용하기 위하여 인젝터로부터 분사되는 분무의 거동 및 미립화 특성을 Mie 산란 및 PDPA 시스템을 이용하여 해석하였으며, 이를 단기통 가시화 엔진에 적용하여 실린더 내의 분무 유동 특성을 검토함으로써 직접 분사식 가솔린 기관의 흡기 포트, 연소실 형상 및 피스톤 형상 설계에 활용하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1 은 실험에 사용된 직접 분사식 가솔

린 엔진의 흡기 포트 형상을 나타낸다. 실험에 사용된 엔진의 흡기 포트는 좌우 대칭의 독립 포트이며, 포트 각은 흡기 저항을 최소화하고 연소실 내에 텀블 유동장을 형성시키기 위하여 39°로 설계하였다. 또한 흡기 포트 입구에 버터플라이 밸브 형상의 스윙 조절 밸브(SCV)를 설치하여 부분 부하시 연소실 내에 스윙 유동을 생성시켜 연소 안정성을 도모하고 스윙 유동에 의한 성층화 혼합기를 만들어 줄 수 있도록 하였다. 한편 인젝터는 30°의 각도로 흡기 포트 하단에 부착하였으며 SCV와 함께 장착 위치를 Fig. 2 에 나타내었다.

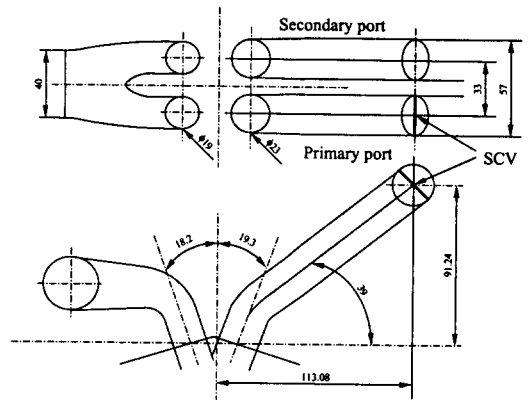


Fig. 1 Schematic diagram for flame visualization

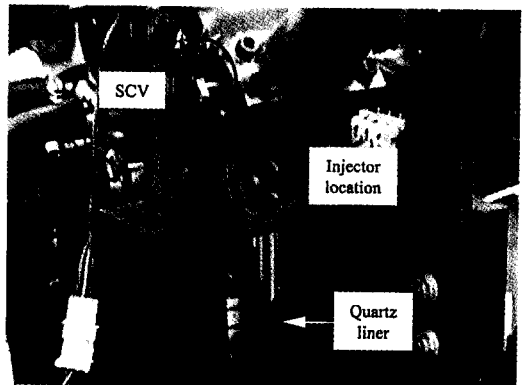
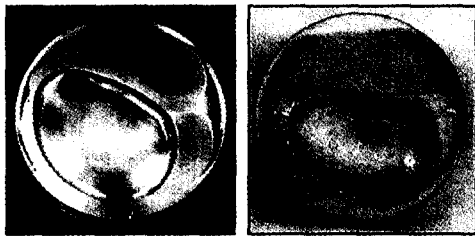


Fig. 2 Photography of SCV and Injector position

Fig. 3 은 실험에 사용된 피스톤 헤드의 형상을 나타낸다. 선도에 나타난 바와 같이 피스톤 헤드에 설계된 타원형의 오목한 부분은 경사지게 설치된 인젝터로부터 분사된 연료가 실린더 내 스웰 유동을 이용하여 연소실 중앙부의 점화 플러그 근처에 성층화 혼합기를 형성할 수 있도록 설계하였다. Table 1 과 2 에 각각 실험에 사용된 엔진의 주요 제원과 피스톤 형상의 주요 제원을 나타내었으며, Table 3 에는 인젝터의 제원을 나타내었다.



(a) Piston type A (b) Piston type B

Fig. 3 Photography of piston head shape

Table 1 Specifications of test engine

<b>Engine</b>	4 stroke, 1 cylinder 4 valve, DOHC	
<b>Displacement</b>	374.6cc	
<b>Bore × Stroke</b>	79.0mm × 81.5mm	
<b>Compression ratio</b>	11.2	
<b>Combustion chamber</b>	Pentroof type	
<b>Valve timing</b>	<b>IVO</b>	13° BTDC
	<b>IVC</b>	41° ABDC
	<b>EVO</b>	43° BBDC
	<b>EVC</b>	11° ATDC

Table 2 Design parameters of the piston model

Piston type	Bowl volume	Bowl bottom curvature	Height of piston top face
A	14.8ml	4mm	6.7mm
B	7.0ml	25mm	4.8mm

Fig. 4 는 실린더 내 분무 유동 가시화를 통한 직접 분사식 가솔린 기관의 혼합기 형성 과정을 해석하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 단기통 가시화 엔진을 이용한 실린더 내의 분무 유동 이미지는 석영으로 제작된 투명 실린더 라이너와 ICCD(768pixel(H)×494pixel(V), 4Quick05A) 카메라를 이용하여 취득하였다. 이 때 광원으로는 최대 1kW 의 출력을 갖는 할로겐 램프를 사용하였으며, 카메라는 연소실 내의 분무 유동을 가시화하기 위하여 경사지게 설치하였다. 또한 취득된 이미지는 640pixel(H)×480pixel(V)의 해상도를 갖는 프레임 그래버(DT3152)를 통하여 컴퓨터에 저장하였으며, 엔코더(3,600ppr, AVL) 및 타이밍 컨트롤러를 사용하여 미리 설정된 크랭크 각 위치에서 정치 화상을 취득할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다.

Table 3 Specifications of test injector

<b>Injector type</b>	High-pressure swirl type
<b>Spray pattern</b>	Hollow cone spray
<b>Cone angle</b>	60° (under atmospheric pressure)
<b>Static flow rate</b>	12.79g/sec @ $P_{inj} = 5\text{MPa}$ 14.37g/sec @ $P_{inj} = 7\text{MPa}$ (P.W. = 25msec, $P_{amb} = 0.1\text{MPa}$ )

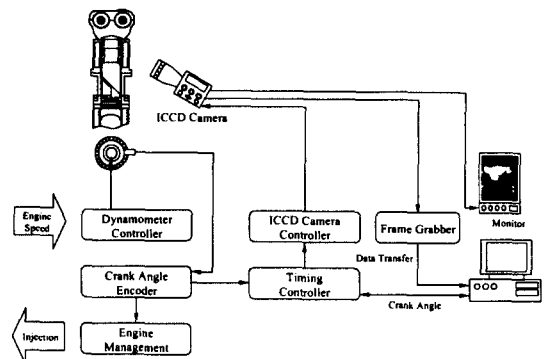


Fig. 4 Schematics of the experimental apparatus

한편 직접 분사식 가솔린 엔진에 적용할 인젝터의 분사 압력의 변화에 따른 분사 유량, 분무 거동 및 미립화 특성을 해석하기 위하여 예비 실험을 수행하였다. 먼저 분사 신호 펄스와 분사된 연료의 동적 유량 선형성을 확인하기 위하여 로드셀(L1900, Futek)을 사용하여 분사 유량을 측정하였으며, 분무의 도달 거리 및 분무각 등과 같은 분무 거동 해석하기 위하여 아르곤 이온 레이저(Coherent, Innova 70)와 ICCD 카메라를 사용하여 분무 가시화 실험을 수행하였다. 또한 Table 4에 나타낸 바와 같이 분무 입자의 평균 직경 및 속도 등과 같은 미립화 특성 해석에는 PDPA(RSA1000, Aerometrics)를 이용하여 측정하였다.

### 2.2 실험 조건

분사 유량 측정은 함수 발생기로부터 분사 신호 펄스폭을 각각 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 3.0, 5.0msec로 변화시키면서 측정하였다. 이 때 분사 압력은 각각 5, 6, 7MPa로 변화시켰다. 분무 가시화는 분사 유량 측정과 동일한 압력 조건에서 분사 기간을 각각 1.0, 3.0, 5.0msec로 변화시키면서 측정하였으며, 분무의 수평 단면 구조를 관찰하기 위하여 인젝터 팁으로부터

터 하류 방향으로 30mm 및 45mm 떨어진 거리에서 수평 단면 분무 가시화 실험을 수행하였다. 한편 실린더 내 분무 유동 특성은 WOT로 엔진을 1,000rpm으로 구동하면서 실험을 수행하였으며, 연료 분사 시기를 ATDC 90°CA에서 ATDC 300°CA까지 20°CA씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 이 때 연료의 분사 압력은 7MPa로 일정하게 유지하였으며, 공기 연료 혼합기를 이룬 공연비로 유지시키기 위하여 분사 기간은 1.1msec로 고정시켰다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 분사 유량

Fig. 5는 연료의 분사 기간 변화에 따른 분사 유량을 분사 압력의 변화에 따라 나타낸 선도이다. 선도에서 알 수 있는 바와 같이 분사 신호폭과 동적 유량 사이의 low-end 선형성이 우수한 것으로 나타나 엔진 적용에 무리가 없는 것으로 판단된다.

### 3.2 분무 거동

Fig. 6은 직접 분사식 가솔린 인젝터의 분사 압력의 변화에 따른 분무 거동을 가시화하

Table 4 Specifications of PDPA system

		Axial (green)	Radial (Blue)
Light source		Ar-ion laser (5W)	
Laser beam diameter		1.4mm	
Wave length		514.5nm	488.0nm
Fringe spacing		3.2μm	3.1μm
Fringe number		36	
Beam waist diameter		117μm	111μm
Focal length	Transmitter	250mm	
	Receiver	250mm	
Collection angle		150°	

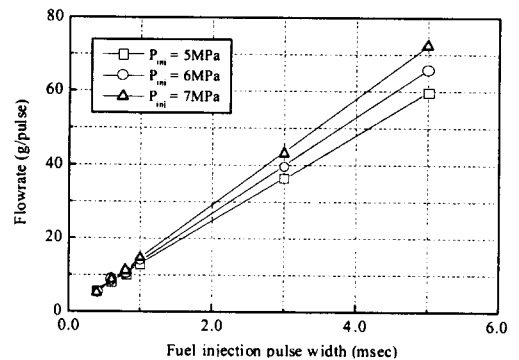


Fig. 5 Effect of injection pressure on injection flowrate with different injection pulse width

여 나타낸 선도이다. 연료의 분사 압력은 5MPa 및 7MPa, 주위 기체의 압력은 0.1MPa, 분사 기간은 3msec 이다. 또한 고압 가솔린 분무의 수평 단면 구조를 살펴보기 위하여 노즐 팁으로부터 축방향 거리가 각각 30, 45mm 지점에서 분무 중심축에 수직한 횡단면의 분무 형태를 함께 나타내었다. 이 때 측정 단면은 가로와 세로의 길이가 각각 120mm, 94mm 이다.

선도에 나타낸 바와 같이 본 실험에 적용된 인젝터와 같은 와류형 인젝터는 인젝터 내부의 접선 방향의 흐름을 통하여 액체 연료를 분사하기 때문에 연료 분무는 원심력에 의해 좌우 대칭의 중공 원추형으로 전개된다. 또한 이와 같은 와류형 인젝터로부터 분사되는 액체 연료는 중공 원추형의 액막을 형성하며, 노즐 팁에서 멀어질수록 액막의 두께가 얇아지고 불안정해져, 결국 액적으로 분열되는 것으로 알려져 있다.<sup>7,8)</sup>

연료를 5MPa의 압력으로 분사한 경우를 살펴보면, 분무 내부의 공기가 연료 액적과 함께 빠른 속도로 흐르기 때문에 분무 내부에서 압력 강하 현상이 발생하여 주위 기체가 분무 내부로 유입되어진다. 이에 따라 분사 후 약 0.8msec에서 분무의 표면에서 분무의 진행 방향과는 반대 방향의 와류가 생성되고 있다. 이 역방향 와류는 주위 액적들을 분무 내부로 유입시키는 효과를 가져와 분무 내부에서는 두 액적들간의 충돌에 의한 합착 현상이 일어날 가능성이 높아져 분무 중심에서 액적의 평균 입경은 증가될 것으로 판단된다. 한편 수평 단면의 분무 구조를 살펴보면, 분사 시간이 경과함에 축방향 거리가 30mm 일 때 분사 후 약 1.4msec에서 중공 원추형 분무 형태가 솔리드콘 형상으로 바뀌고 있어 분

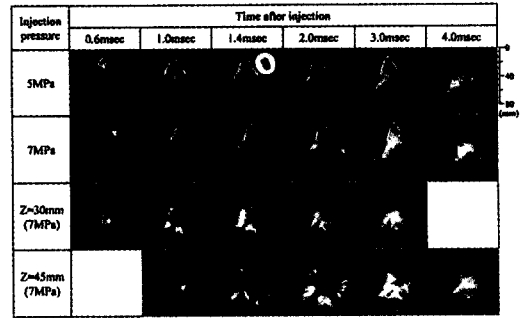


Fig. 6 Spray developments and overall structure of the high-pressure swirl-type gasoline injector

무 외곽에 형성된 역방향 와류로 인하여 액적이 분무 내부로 유입되고 있음을 다시 한번 확인할 수 있다. 축방향 거리가 45mm인 지점에서는 분사 후 약 3.0msec에서 역방향 와류가 이미 완전하게 발달한 것을 알 수 있으며, 분사 후 약 4.0msec의 가시화 결과에서 알 수 있듯이 분무의 산란 강도가 작게 나타나고 전체 분무 영역에서 균일하게 분포하는 것으로 보아 역방향 와류는 주위 기체와의 마찰로 인하여 액적의 2차 미립화를 촉진시키고 균일한 입경 분포에 기여할 것으로 판단된다.

### 3.3 미립화 특성

Fig. 7은 분사 중심축에서 분사 거리 변화에 따른 연료 액적의 평균 속도 및 SMD 분포를 나타낸다.

축방향에서 분무 입자의 SMD는 17 $\mu$ m 이하로 아주 작게 나타났으며, 노즐 팁에서부터 미세하게 분열이 이루어진 액적이 주위 공기와의 마찰로 인한 2차 미립화로 노즐 팁에서 축방향 거리 15mm 지점 근처까지는 SMD가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 분무 가시화 결과에서 설명한 바와 같이 역방향 와류로 인한 주위 기체의 유입 효과로 인하여 분무

내부에서 분무 입자들간의 충돌 및 합착이 일어나 SMD 및 액적의 평균 속도는 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8에 나타난 SMD 및 평균 속도의 반경 방향 분포를 살펴보면 분사 압력이 증가할수록 분무 액적의 직경은 감소하는 것으로 나타났으며, 축방향 거리가 25mm 인 지점에서는 중공 원추형의 분무 구조로 인하여 분무 외곽인 9~12mm 지점에서 최대값을 나타내고 있으나, 축방향 거리가 40mm 지점에서는 어느 정도 균일하게 입경이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이는 분무 표면에서 형성된 역방향 와류로 인한 연료 액적의 2차 미립화 효과에 의한 결과로 판단된다. 이상의 결과로부터 본 실험에 적용된 인젝터로부터 분사된 연료 액적은 SMD가 약 20 $\mu$ m 이하로 나타나 우수한 미립화 특성을 나타내고 있는 것으로 판단된다.<sup>6)</sup>

### 3.2 실린더 내 분무 유동

Fig. 9는 WOT 상태로 엔진을 1,000rpm으로 운전하였을 때의 실린더 내 분무 유동을 가시화하여 나타낸 선도이다. 이 때 연료는 이론 공연비로 조절하기 위하여 분사 기간을 1.1msec로 고정하여 공급하였으며, 연료의 분사 압력 및 분사 시기는 각각 7MPa, ATDC 90°CA이다.

연료 분사는 ATDC 96°CA까지 분사되고 있으며, 분사된 연료가 흡기 밸브와 충돌하고 있는 것을 확인할 수 있다. 한편 SCV를 작동하여 실린더 내 스윙 스윙 유동을 형성시켰을 경우 ATDC 100°CA의 연료 분무 거동을 살펴보면, 피스톤 B가 피스톤 A에 비해 피스톤 헤드 상단에 보다 진한 혼합기를 형성시키고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이는 피스톤 B의 보울 체적이 작고 곡률 반경이 크기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

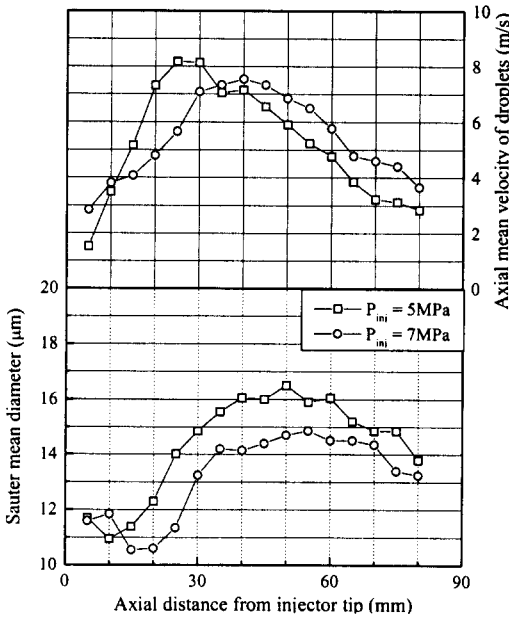


Fig. 7 Axial distribution of SMD and axial mean velocity at the center of injection axis

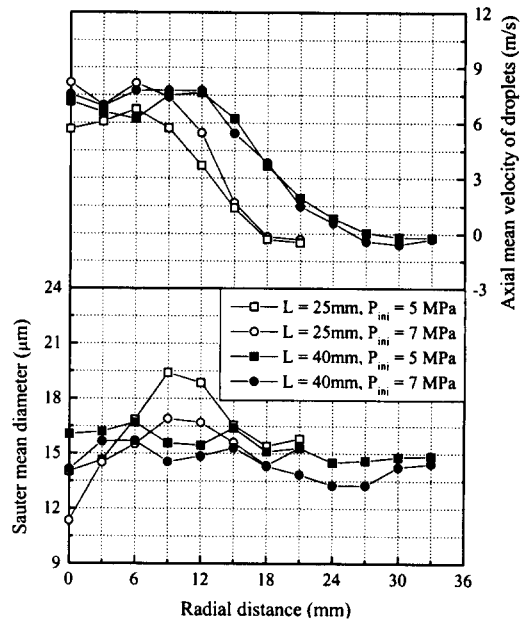


Fig. 8 Radial distribution of SMD and axial mean velocity at different axial distance

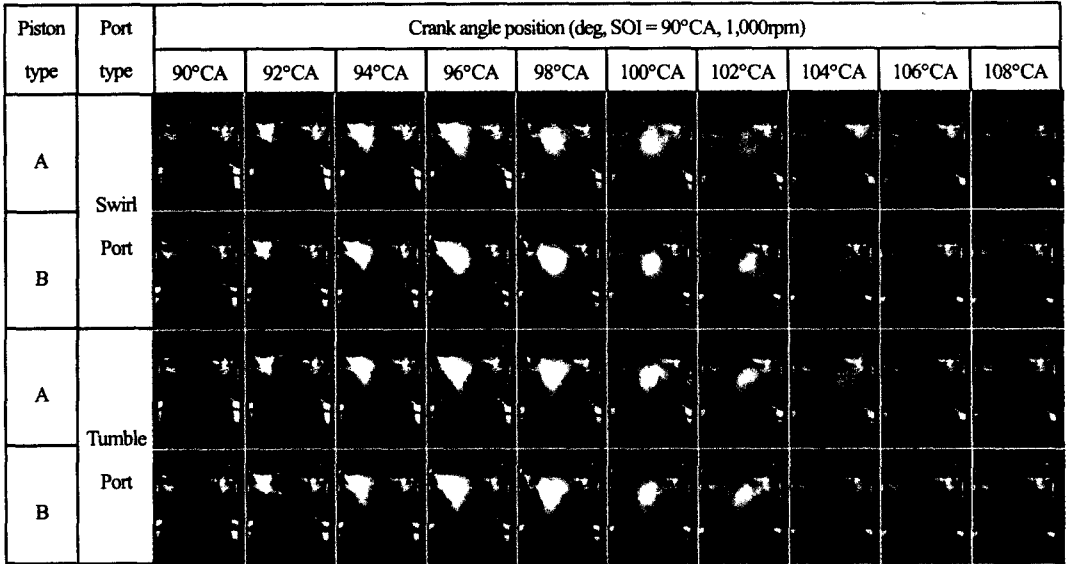


Fig. 9 In-cylinder spray flow motion at ATDC 90° fuel injection

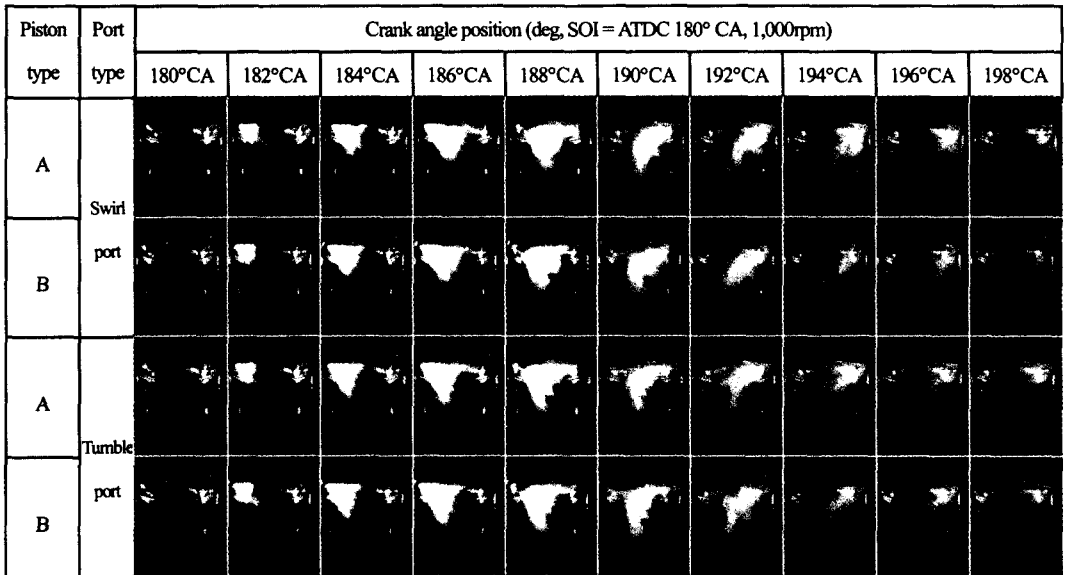


Fig. 10 In-cylinder spray flow motion at ATDC 180° fuel injection

또한 텀블 포트를 사용한 경우, 실린더 내에 형성된 텀블 유동에 의해 분무의 도달 거리가 스웰 포트를 사용한 경우에 비해 크게 나타나고 있으며, 분무의 확산 영역도 넓게 나타나고 있다. 이러한 경향은 Fig. 10에 나타

낸 연료의 분사 시기가 ATDC 180°CA 인 경우에 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이상의 결과로부터 본 실험 엔진의 초기 분사 모드에서는 실린더 내 텀블 유동이 스웰 유동에 비하여 균일 혼합기를 형성시키는데 효과적인 것으로

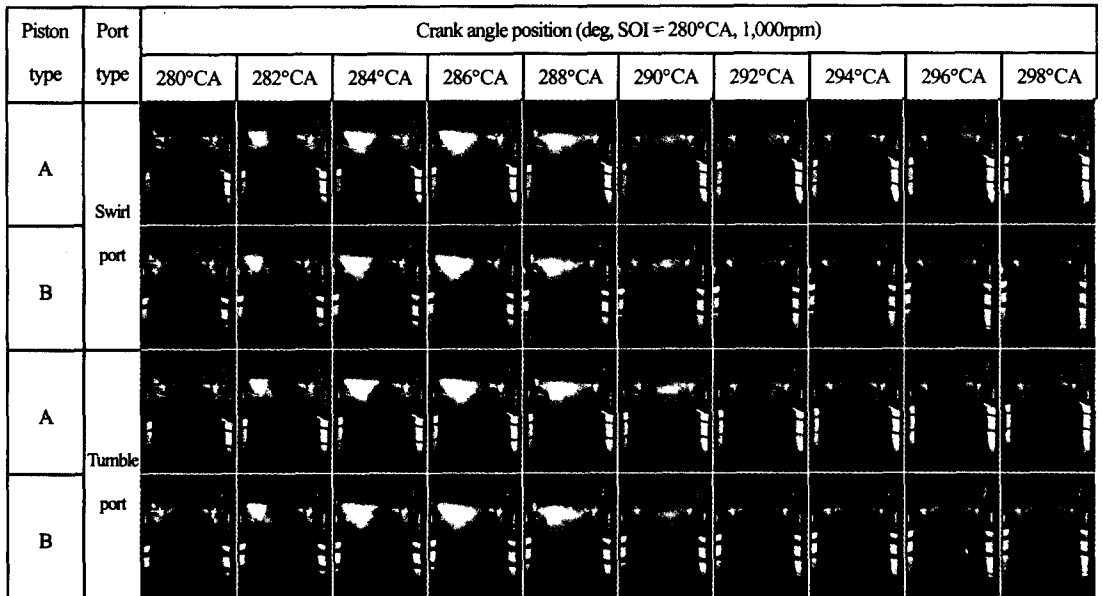


Fig. 11 In-cylinder spray flow motion at ATDC 280° fuel injection

나타났으며, 텀블 유동이 스웰 유동에 비하여 균일 혼합기를 형성시키는데 효과적인 것으로 나타났으며, 성층화 혼합기 형성에는 피스톤 B가 효과적인 것으로 판단된다.

Fig. 11에 나타낸 실린더 내 분무 유동 가시화 결과는 연료를 ATDC 280°CA에 분사한 경우이다. 이 경우에는 분사된 연료가 상승하는 피스톤 헤드와 충돌하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 스웰 포트를 사용한 경우 ATDC 290°CA에 실린더 내에 상대적으로 진한 혼합기 영역이 형성되고 있으며, 이 영역은 피스톤이 상승함에 따라 연소실 상단을 향하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에 적용된 엔진은 후기 분사 모드에 실린더 내 성층화 혼합기를 형성시키는데 스웰 유동이 보다 효과적인 것으로 생각된다. 또한 스웰 포트를 사용한 경우 ATDC 290°CA에 실린더 내에 상대적으로 진한 혼합기 영역이 형성되고 있으며, 이 영역은 피스톤이 상승함에 따라 연소실 상

단을 향하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에 적용된 엔진은 후기 분사 모드에 실린더 내 성층화 혼합기를 형성시키는데 스웰 유동이 보다 효과적인 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

직접 분사식 가솔린 기관의 혼합기 제어 기술을 확립하고 이를 엔진 설계에 적용하기 위하여 가솔린 고압 인젝터로부터 분사되는 액체 연료의 분무 특성을 Mie 산란 및 PDPA 시스템을 이용하여 해석하고, 단기통 가시화 엔진 및 ICCD 카메라를 이용하여 실린더 내의 분무 유동 특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험에 적용된 인젝터로부터 분사된 연료는 분사 신호폭과 동적 유량 사이에 우수한 low-end 선형성을 나타내었으며, 액적의 SMD도 약 20 $\mu\text{m}$  이하의 미립화 특성을



나타내어 직접 분사식 가솔린 엔진의 적용에 무리가 없는 것으로 판단하였다.

- 2) 가솔린 고압 와류형 인젝터는 분무 표면에 역방향 와류를 형성시키며, 이 역방향 와류는 분무 하류에서 액적의 2차 미립화를 촉진시키고 반경 방향으로 액적의 평균 입경을 균일하게 분포시킨다.
- 3) 본 실험에 적용된 직접 분사식 가솔린 엔진의 경우, 초기 분사 모드에서는 실린더 내 텀블 유동이 스웰 유동에 비하여 균일 혼합기를 형성시키는데 효과적인 것으로 나타났다으며, 성층화 혼합기 형성에는 피스톤 B가 효과적인 것으로 판단하였다.
- 4) 실린더 내 분무 유동 가시화를 통하여 직접 분사식 가솔린 기관의 혼합기 제어 기술을 확립하였으며, 이는 직접 분사식 가솔린 기관의 흡기 포트, 연소실 형상 및 피스톤 형상 설계시 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) W.K. Cheng, D. Hamrin, J.B. Heywood, S. Hochgreb, K. Min, and M. Norris, "An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanis in Spark-ignition Engines", SAE Technical Paper No. 9332708, 1993.
  - 2) H. Ando, "Combustion Control Technologies for Gasoline Engines", ImechE S433/001/96, 1996.
  - 3) F. Zhao, M. Lai, and D.L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines", SAE Paper 970627, 1997.
  - 4) G.K. Fraidl, W.F. Pioock, and M. Wirth, "Gasoline Direct Injection: Actual Trends And Future Strategies For Injection And Combustion Systems", SAE Technical Paper 960465, 1996.
  - 5) L.G. Dodge, "Fuel Preparation Requirements for Direct-injected Spark Ignition Engines", SAE Technical Paper 962015, 1996.
  - 6) F. Zhao, M. Lai, and D.L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct Injection Gasoline Engines", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.25, No. 5, pp.437~562, 1999.
  - 7) 이상용, 액체의 미립화, 민음사, 1996.
  - 8) A. H. Lefebvre, Atomization and Spray, Hemisphere Publishing Corp., 1989.
- 1) W.K. Cheng, D. Hamrin, J.B. Heywood, S. Hochgreb, K. Min, and M. Norris, "An Overview