

## 가솔린 직접분사식 고압선회 분사기의 분무 영역별 분무 특성 고찰

송범근<sup>†</sup> · 김원태<sup>\*</sup> · 강신재<sup>\*\*</sup>  
(2001년 11월 30일 접수, 2002년 11월 30일 심사완료)

### Spray Characteristics for Specified Regions of High Pressure Swirl Injector in Gasoline Direct Injection Engine

Bhum Keun Song, Won Tae Kim and Shin Jae Kang

**Key Words:** GDI(가솔린 직접 분사), PDPA(위상 도플러 입자 분석기), Leading Region(분무선단 영역), Main Spray Region(주분무영역), Vortex Cloud Region(와운영역)

#### Abstract

According as the industry was developed, the pollution of the environment and atmosphere rose up to the surface. So, the focus is now concentrated on the engines of affinity for nature. And the investigators make more effort to the improvement in the performance of engines, depending to the prices of oil and the anxiety about the exhaustion of the fossil fuel go up. So the GDI engines head up for these necessities. In this experimental study, the spray flow characteristics for a commercial injector equipped in the present GDI engine were investigated, which had a strong influence on the engine performance and emissions. The experiment was performed at the injection pressures of 1, 3, 5 and 7MPa under the atmospheric condition. A PDPA system was used to specify the flow characteristics of the spray. Also, the global spray behavior classified into three regions as leading, main spray and vortex cloud region, was analyzed by using a visualization system. And the regions were compared with each other.

#### 기호설명

Pi : 분사압력  
Ti : 분사후 시간  
Rs : 분무영역

#### 1. 서 론

20세기에 인간생활과 산업계에 가장 크게 영향

을 끼친 공업제품 중의 하나는 역시 자동차이다. 이러한 자동차 산업의 급속한 발달과 더불어 환경 및 대기 오염 문제가 심각하게 대두되면서 환경 친화적인 엔진에 대한 관심이 모아졌다. 또한, 유류 가격의 반등과 화석 연료 자원의 고갈에 대한 우려가 커지며 엔진의 성능향상 및 에너지 절약에 대한 연비향상에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 필요성에 의해 PFI(Port Fuel Injection) 엔진에 차세대 엔진 모델로서 GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진이 대두되었으며, GDI 엔진에 대한 연구가 활발히 진행되어, 실용화에 이르렀다.<sup>(1-5)</sup> GDI 엔진은 연소실 내에 연료를 직접 분사하기 때문에 수송 지연이 생기지 않으며, 흡기포트 벽면 젖음 현상이 감소되어 냉간 시동성 및 과도 응답성이 우수할 뿐만 아니라 연료의 증발 잠열에 의한 흡입 공기의 냉각 효과를 갖고 있기 때문에 열효율 및 체적 효율의 향상 등이 GDI 엔

<sup>†</sup> 책임저자, 전북대학교 대학원  
<sup>\*</sup> 회원, 전북대학교 대학원  
TEL : (063)277-7308 FAX : (063)277-7308  
<sup>\*\*</sup> 전북대학교 기계항공시스템공학부,  
자동차 신기술 연구소

진에 대해 가장 잘 알려진 장점이다.<sup>(6-8)</sup> 또한, 직접 분사식 가솔린 기관의 특징 중의 하나가 부분 부하 영역에서 성층화 연소에 의해 초회박 연소로 유해 배기 가스의 주요 물질인 CO의 저감 및 연비를 향상시킬 수 있으며, 고부하 영역에서는 이론 공연비의 연소 방법에 의한 고출력을 기대할 수 있다.<sup>(9)</sup> 이렇게 GDI 엔진은 부분부하영역에서와 고부하 영역에서의 작동 모드가 달라서 혼합기의 형성과정이 복잡하여, 연소실 내에서 혼합기가 형성되는 위치가 최적화되어야 한다. 뿐만 아니라, 연소실 내에 연료를 직접 분사하는 GDI는 포트 내에 연료를 분사하는 PFI에 비해 연료의 분무유동 특성이 연소에 큰 영향을 주기 때문에, 혼합기 형성과정에 대한 분무 유동 특성이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 현재 GDI 엔진에 장착되어 시판중인 고압 선회 분사기에서 분사되는 분무의 형성과정과 분무 유동 특성을 고찰하고자 하였다. 이에 분사기의 고압 연료 분사를 유지시키기 위해 고압연료 공급장치를 제작하였으며, 분무 가시화 장치를 이용하여 가솔린 고압 분무의 발달 과정을 연구하였다. 분무의 가시화 실험으로 획득한 영상을 이용하여 분무 관통도와 최대 분무폭을 측정하였으며, 이 영상을 분석하여 분무의 형성과정에 대한 특성에 따라 분무의 영역을 구분하여 비교하였다.<sup>(10)</sup> 또한, PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) system을 이용하여 평균 액적 직경과 액적의 속도를 측정하여 각 영역에 대한 분무 유동 특성을 고찰함으로써 GDI 분사기의 고부하 작동 모드에 대한 메카니즘을 고찰하고 분무 유동 특성을 실험적으로 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 분사기는 일본에서 현재 상용화된 미쯔비시사의 단공 고압 선회 GDI 분사기이다. Fig. 1에서 연구 분사기의 외형과 내부 단면 형상을 보이고 있다. 분사기의 편향각(off-set angle)은 없으며, 오리피스의 직경은 0.85 mm이다.

직접분사식 가솔린 분사기에 안정적으로 고압을 공급시키기 위해 Fig. 2와 같이 고압 질소(N<sub>2</sub>) 탱크 3개를 사용한 고압연료공급장치를 구성하였

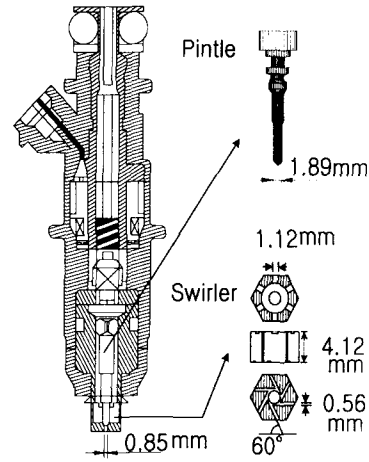
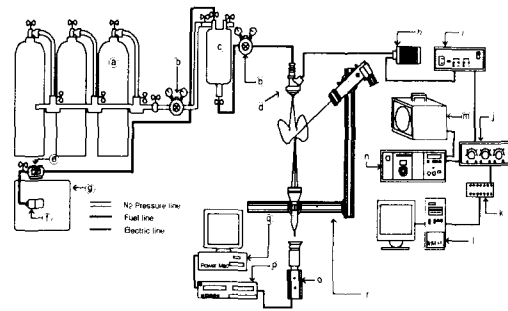


Fig. 1 Detail of high pressure swirl injector



④ N<sub>2</sub> Tank ⑤ pressure regulator ⑥ high pressure fuel tank ⑦ injector ⑧ fuel filter ⑨ fuel pump ⑩ fuel tank ⑪ injection driver ⑫ injection unit ⑬ amplifier ⑭ A/D converter ⑮ injection control computer ⑯ stroboscope ⑰ stroboscope control panel ⑱ CCD camera ⑲ VTR ⑳ image analysis computer ㉑ PDPA system

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

다. 연료 분사 제어부는 분사기의 솔레노이드 밸브를 개폐하여 간헐적인 분무를 생성하기 위하여, 연료 분사 조절장치를 A/D 변환기(A/D 3100)를 통하여 IBM PC와 인터페이스하여 컴퓨터에 의해 연료 분사시기와 기간을 조절할 수 있도록 하였다. 직접분사식 가솔린 선회 분사기의 분무 거동 특성을 관찰하기 위한 가시화 장치는 스트로보스코프(MSP-120, power=120W)와 컨트롤 패널(MSC-1)로 구성된 스트로보스코프 시스템으로 발광주기를 연료분사기의 분사주기와 함께 컴퓨터로 동시에 조절할 수 있게 하여 스트로보스코프의 발광시기를 지연시킴으로서 분사 개

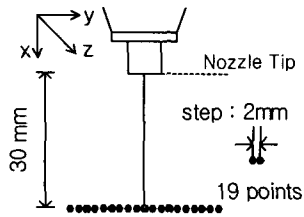


Fig. 3 PDPA measurement points

시 이후 임의의 시간에 정지 분무 영상을 얻어 CCD카메라(Toshiba, IK - 536)를 이용하여 파워 맥킨토시(Power Mac, 7500/100) 컴퓨터로 받아 동시에 VTR에 기록하고 영상처리 소프트웨어를 사용하여 분무거동을 분석하였다.

본 연구 분사기의 미립화 특성을 고찰하기 위하여 PDPA를 이용하여 분무의 액적 크기를 측정하였다. 본 연구에서는 레이저 광계측 장치인 PDPA 시스템의 광원으로 공냉식 Ar-ion 레이저(Ion Laser Technology, Max. Power : 750 mW)를 사용하였다. 신호처리는 DANTEC (58N50)사 제품을 사용하였다.

2.2 실험방법

대기중에 연료를 분사시켜 실험하였고, 분사기의 분사압은 1~7MPa까지 2MPa씩 증가시키며 분사압의 변화에 따른 분무 특성을 고찰하였다. 분사기간은 2.5ms, 측정 위치는 가시화 실험으로 획득한 영상을 분석하여, 분사기 선단에서 축방향 30 mm 위치에서 구분된 각 영역의 측정이 가능하다고 판단하여, 축방향 30 mm 위치에서 spray center를 중심으로 좌우 대칭으로 2 mm 간격으로 19개 지점을 측정하였다. Fig. 3에서 축방향과 반경방향의 측정점 위치를 보여주고 있다. 한 측정점에서 20,000여 개의 데이터를 획득하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 연료분사기의 특성을 파악하기 위하여 각 분사압에 대해 분사기간 0.2 ms에서 4.0 ms까지의 연료 분사량을 각 분사기간에 대해 1회 분사시 분사되는 연료량을 나타낸 그래프이다. 연료 분사량은 뒤에 고찰하게 될 분무관통도와 분무폭에 상당한 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나이다.

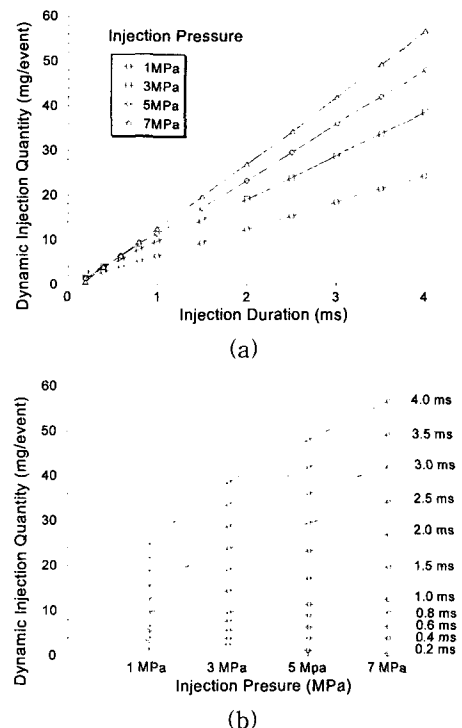


Fig. 4 Dynamic fuel injection quantity with injection duration and pressure

Fig. 4(a)는 각 압력의 변화에 대하여 동일한 분사기간에 대한 분사량을 고찰하기 위하여 압력과 분사기간의 증가에 따른 변화를 보여주는 그래프이다. 동일한 분사압력에서는 분사기간이 증가함에 따라 선형적인 증가를 보이는데, 이는 이들이 열려있는 시간이 지속되어 분사기의 오리피스로부터 분출되는 연료량이 증가하기 때문이다. Fig. 4(b)는 동일한 분사기간에 대하여 압력의 증가에 따른 분사량의 변화를 고찰하기 위하여 나타낸 그래프이다. 동일한 분사기간에 대하여 압력의 증가에 따라 분사량이 점진적으로 증가하는 경향을 보이지만 0.2 ms에서는 압력이 증가함에 따라 오히려 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 분사기에서 연료가 분사되기 위해서는 분사기에 분사펄스가 공급되면서 솔레노이드 코일에 전류가 흘러 아마추어가 자기되어 일체로 구성되어 있는 핀틀 밸브의 플랜지부분이 스톱퍼에 닿을 때까지 흡인된다. 이 때, 코일 스프링력에 의해 오리피스 출구에 밀착되어 있던 핀틀 밸브가 열리면서 연료가 분사되는데, 다른 분사기간보다 상대적으로 매우 짧은 시간인 0.2 ms에서는 분사

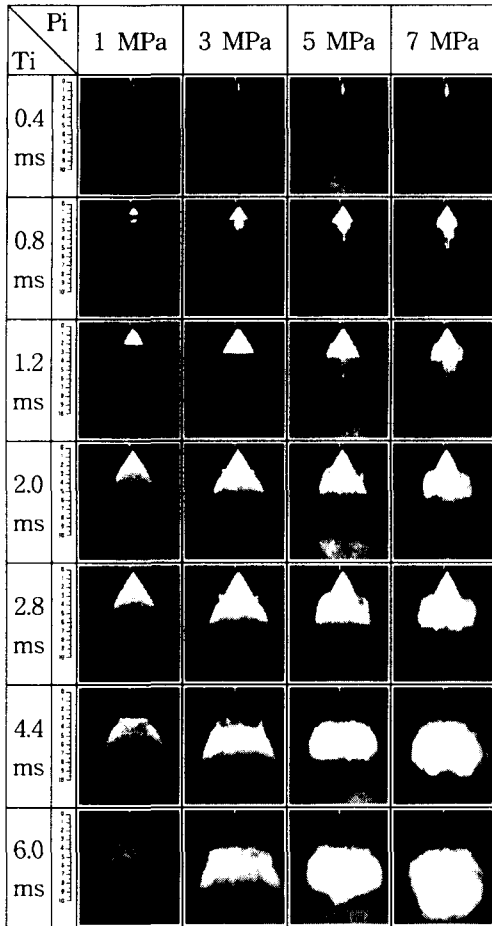


Fig. 5 Temporal spray development for varying injection pressure

압이 증가함에 따라 전자기력에 의한 핀틀 상승이 고압에 의해 최대 양정까지 오르지 못하고 닫혀서 오히려 연료 분사량이 감소하는 경향을 보여주는 것으로 사료된다. 또한, 0.4 ms에서 어느 정도 동일한 분사량을 보이다 그 이후는 분사압이 증가함에 따라 점진적으로 분사량이 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 각 분사압에 대하여 가시화 실험에서 획득한 정지분무 영상이다. 분무 거동 형상은 분사 초기엔 선회기 내부에 정체해 있던 연료에 의해 solid jet 형태로 분무되며, 분무가 발달함에 따라 선회기에 의해 hollow cone 형상의 분무를 형성한다. 또한, 분무 말기에는 분무가 정지 대기를 관통함에 따라 분무 내부의 압력이 낮아져 외부에서 유입되는 순환공기에 의해 커다란 재순환

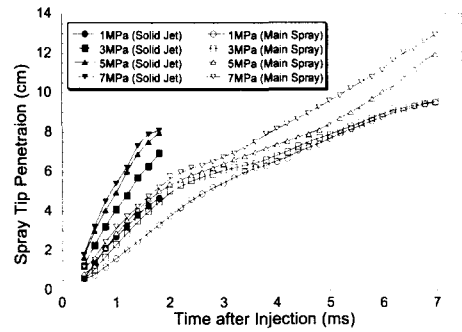


Fig. 6 Variation of the spray penetration for varying injection pressure

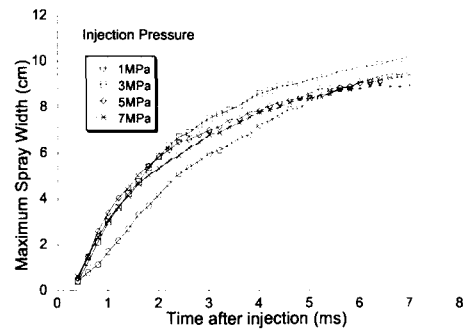


Fig. 7 Variation of the maximum spray width for varying Dynamic fuel injection quantity with injection duration and pressure

의 분무형상이 형성된다. 분사압의 변화에 대하여 각 분무 형성에 대한 시간과 크기는 다르지만 유사한 분무특성을 보였다.

Fig. 6과 7은 분무 관통도와 최대 분무폭으로 가시화 실험으로부터 획득한 정지분무영상을 이미지화하여 각 분사 지속시간 마다 10 프레임을 측정하여 정량화하여 비교하였고, 이를 평균하여 나타낸 그래프이다. 일반적인 포트분사식의 가솔린 연료 분사의 경우 디젤 분무와는 달리 예혼합된 혼합기가 실린더 내로 유입되어 연소가 이루어지기 때문에 상대적으로 분무 관통도와 최대분무폭 등에 대한 연구가 미진하였지만, GDI 엔진의 경우 연소실 내에 직접 연료를 분사하기 때문에 연료의 연소실 벽면젖음 현상이나 피스톤 헤드 또는 캐비티(cavity)에 대한 충돌현상 등 연소에 바람직하지 않은 현상들을 감소시키기 위해 고려되어야 할 중요한 인자들이다.

Fig. 6의 분무 관통도는 분사 초기에 solid jet 형상의 큰 액적들이 매우 빠르게 진행되는 분무가 관찰되나 소량이기 때문에 1.8 ms이후에는 이미 하류로 진행해버리거나 기화되어 육안식별이 불가능하게 된다.

따라서 solid jet 형상의 액적군의 분무 관통도와 주 분무영역의 분무 관통도를 각각 측정하여 나타내었다. 먼저 solid jet의 분무 관통도를 살펴보면 압력이 증가함에 따라 급격히 관통도가 증가하나 5 MPa과 7 MPa은 비슷한 양상을 보인다. 주분무영역의 분무 관통도는 시간과 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 일반적인 경향은 분사초기에는 빠르게 진행하고 있으나 시간의 경과에 따라 증가폭이 완만해지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 분사 초기에는 분사압력에 의해 큰 운동량으로 분출되는 연료 액적들이 분무 하류 방향으로 진행하면서 정지 대기의 유체 역학적 항력과 운동량의 교환, 그리고 액적들의 분열이 이루어지면서 운동량이 감소하여 분무 선단의 진행속도가 완화된어지기 때문이다.

Fig. 7의 최대 분무폭은 분사압 1 MPa의 경우 가장 작은 값으로 완만한 증가를 보였으며, 3 MPa에서 최대치를 나타내고 있다. 3 MPa보다 높은 분사압인 5, 7 MPa로 갈수록 오히려 최대 분무폭이 감소하고 있다. 일반적으로 분무각은 압력이 높아질수록 커지는 것이 일반적이지만 최대 분무폭의 경우 1, 3 MPa에서는 외부공기 유입현상, 즉 관통하는 분무에 의해 분무 내부의 압력이 낮아지면서 외부공기가 유입되는 현상이 분무 주류에 많은 영향을 미치지 못하기 때문에 분무가 계속 확장되지만, 5, 7 MPa의 경우 높은 압력에 의해 유입현상이 극대화되면서 vortex가 생겨나고 이로 인해 분무폭이 확장되지 못하고 오히려 감소하는 것으로 사료된다.

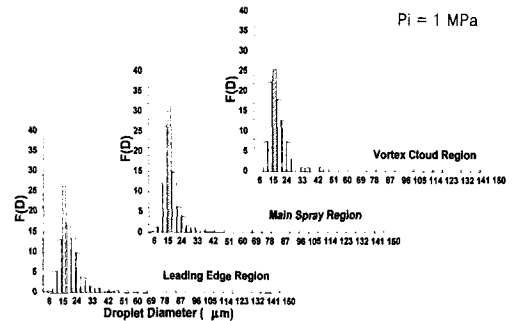
분무 영역을 특성화한 가시화 사진들로부터 각 분사압들에 대하여 분사기 팁으로부터 30 mm의 위치에서 각 분무영역의 측정이 가능하다고 판단됐다. 따라서, 가시화 사진들과 PDDA 데이터를 분석하여 30 mm에서 타당하게 비교가 가능한

분무 선단, 주 분무 그리고 와운 영역의 3개 영역으로 크게 구분하고 분사개시 이후 각 영역의 시간대를 구분하여 Table 1을 작성하였다. 이 Table을 기준으로 획득한 PDDA 데이터로 액적들의 평균속도 및 평균액적크기 등을 비교, 분석하였다.

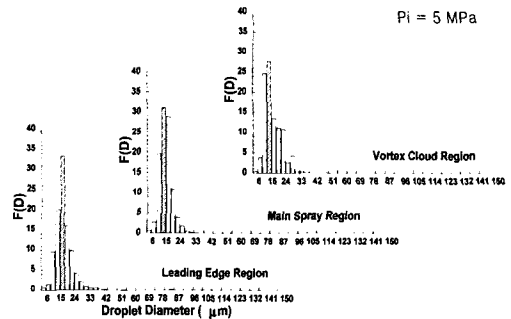
Fig. 8은 분사기 선단으로부터 수직방향으로 30 mm 위치의 분무중심 측정점에서 각 영역에 대한 액적들의 수확률밀도분포를 나타낸 그래프이다. 분사압 1 MPa에서는 모든 영역에서 비슷한 경향을 보이며 12~15 μm에서 최대빈도수를 나타내며, 분사압 5 MPa의 경우 분무 선단 영역에선 12~15 μm, 그리고 나머지 영역에서는 9~12 μm에서 최대빈도수를 보인다. 각 영역에 대하여 분무선단영역에서는 분사압 1 MPa일 때 직경 42 μm 이상의 액적들이 분사압 5 MPa일 때보다 많은 액적들이 나타나고 있으며, 약 13 μm 이하의 액적들은 분사압 1 MPa의 경우 약 42%, 그리고 분사압 5 MPa는 65%의 백분율을 보인다. 주분무 영역과 와운영역에서는 약 13 μm 이하의 액적들이 분사압 1 MPa의 경우 각각 약 71%, 55%, 그리고 분사압 5 MPa는 각각 83%,

**Table 1** Time classification of the spry region

Pi	Rs	Ti (ms)		
		Leading	Main Spray	Vortex
1 MPa	1.5~1.7	1.7~5.9	5.9~6.1	
3 MPa	1.3~1.5	1.5~5.7	5.7~5.9	
5 MPa	1.1~1.3	1.3~4.9	4.9~5.1	
7 MPa	0.9~1.1	1.1~4.5	4.5~4.7	



(a) Injection pressure = 1 MPa



(b) Injection pressure = 5 MPa

**Fig. 8** Droplet size distribution for each region at spray center

70%의 백분율을 보인다. 따라서 분사압이 증가할수록 분무 중심부에서 미립화가 향상되는 것을 알 수 있다. 이는 분사압이 커질수록 미립화에 사용될 수 있는 운동에너지가 커져서 미립화가 향상되기 때문이다.

Fig. 9는 Table 1에 따라 구분된 각 영역의 분무 평균속도분포를 고찰하기 위하여 1, 3, 5 그리고 7 MPa의 분사압으로 분사기 선단으로부터 30 mm 위치에서 측정된 PDPA data의 각 영역별 축방향 평균속도( $u$ )와 반경방향 평균속도( $v$ ) 성분의 합성평균속도분포를 속도벡터와 평균액적직경으로 표현한 그래프이다. 일반적으로 분무선단 영역의 속도가 가장 빠르게 나타나며 평균액적직

경은 분무의 외곽부에서 크게 나타나고, 내부에서는 작게 나타나 증공원추형의 분무 형상을 보여주고 있다. 또한, 분사압이 증가함에 따라, 그리고 영역의 진행에 따라 분무 속도가 감소하는 경향을 보이며, 분무 말기인 와운영역에서는 그 속도가 현저히 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 분사 초기에는 분사압력에 의해 큰 운동량으로 분출되는 연료 액적들이 분무 하류 방향으로 진행하면서 정지 대기의 유체역학적 항력과 운동량의 교환, 그리고 액적들의 분열이 이루어지면서 운동량이 감소하여 분무 선단의 진행속도가 완화되어지고, 이에 따라 미립화가 진행되고 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한 분무선단영역에

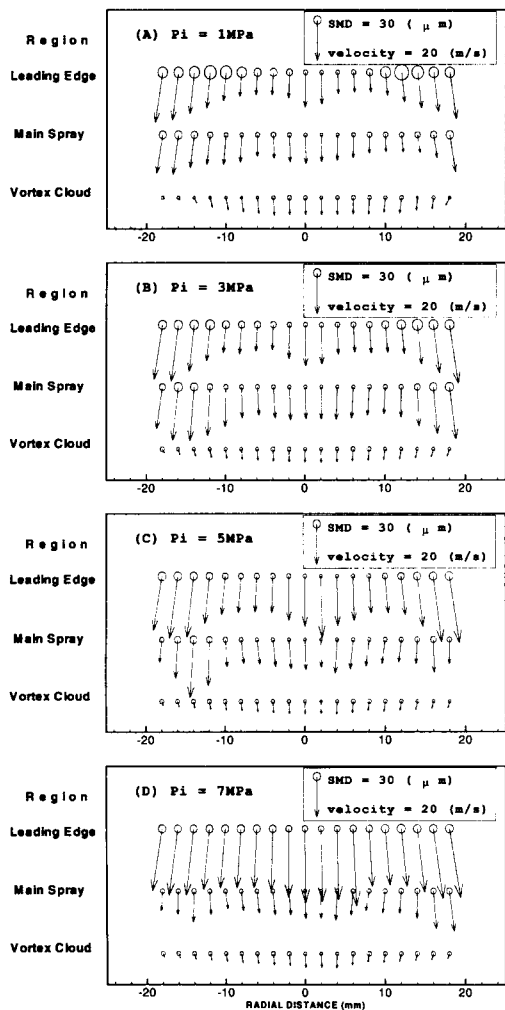


Fig. 9 Plot of  $u$ - $v$  flow vector with mean droplet diameter for each region

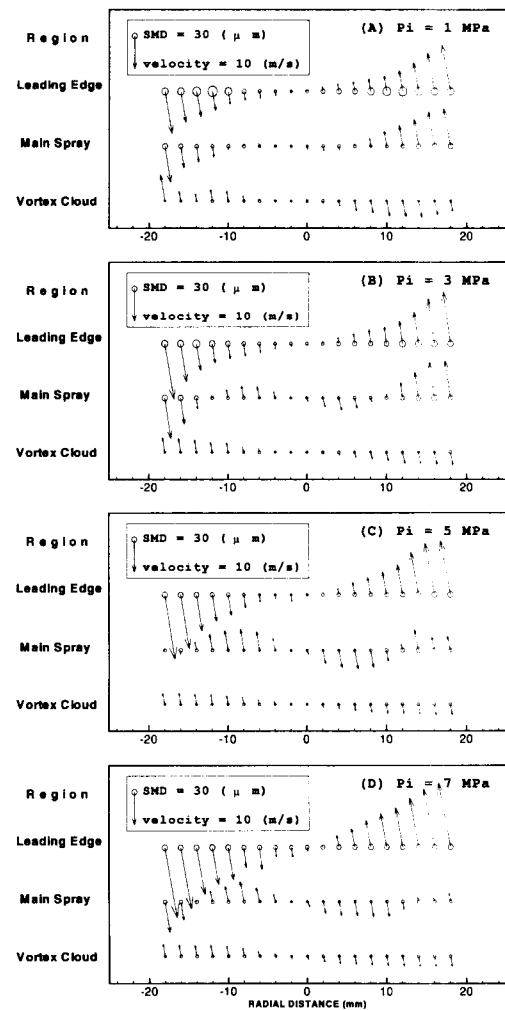


Fig. 10 Plot of  $v$ - $w$  flow vector with mean droplet diameter for each region

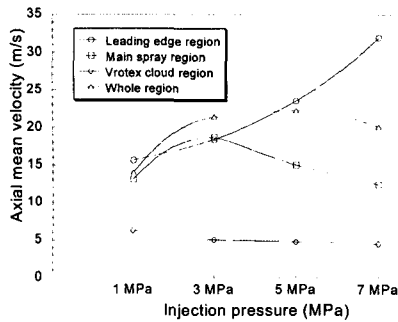


Fig. 11 Axial mean velocity at each region for varying pressure

서 분무 외부로 향하는 반경방향의 속도가 와운 영역에서는 외부공기 유입현상에 의해서 속도방향이 분무 내부방향으로 변하는 것이 관찰된다.

Fig. 10은 분사압력의 변화에 따른 Y-Z 평면의 각 영역 분무 평균속도분포와 선회의 방향성을 고찰하기 위해 반경방향 평균속도(v)와 접선방향 평균속도(w) 성분의 합성평균속도분포를 속도벡터와 평균액적직경으로 표현한 그래프이다. v-w 속도는 초기의 분무 선단 영역에서 선회기에 의해서 시계방향으로 선회가 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있으며, 외부공기 유입현상에 의해서 주 분무 영역으로 진행하면서 내부에서부터 액적들이 반대 방향으로 진행하다 와운영역에서는 완전히 역전되는 현상이 관찰된다.

Fig. 11은 분사기 선단으로부터 30 mm 위치 측정점들의 축방향 속도인자를 라인평균을 취하여 분사압의 변화에 따른 전체 분무와 각 영역의 축방향 평균속도를 비교한 그래프이다. 분무선단 영역의 속도는 선형적으로 증가하지만, 3 MPa를 기점으로 전체 분무와 주분무영역에서의 속도는 점차 감소하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이는 분사압이 증가함에 따라 선회기에 의해서 축방향 속도보다 반경방향 또는 접선방향으로 운동량의 비중이 커져서 축방향 평균속도는 감소하는 것으로 사료된다. 또한 와운영역에서는 다른 영역에 비하여 큰 변화는 없지만 1 MPa에서 최대를 보이고 분사압이 증가할수록 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 축방향 속도에 대한 분사압의 영향은 다른 영역에 비하여 분무선단영역에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가솔린 직접분사식 고압 선회 분사기의 분사압력 변화에 대한 분무특성을 실험하여 분무 가시화에 의한 영상처리방법으로 분무거동 특성을 고찰하고 분무특성에 따라 분무 영역을 구분하였으며, 액적들의 3차원 속도 및 크기에 따른 각 영역의 유동특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분무유동 가시화 실험을 통하여 좌우 대칭의 증공원추형 분무 형상을 확인하였으며, 분무형상과 분무의 진행과정에 따라 분무특성을 비교하기 위하여 분무 선단, 주 분무 그리고 와운 영역의 3개 영역으로 구분하였다. 분무관통도는 분사압력의 증가에 따라서 선형적인 증가를 보였고, 최대분무폭은 분사압이 증가함에 따라 주위공기의 유입 현상이 증대되면서 축방향 vortex가 생성되고 이로 인해 분무폭이 확장되지 못하고 오히려 감소하여 분사압 3 MPa에서 최대치를 보이며, 분사압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다.

(2) 분무선단영역에서는 약 13 μm 이하의 액적들은 분사압 1 MPa의 경우 약 42%, 그리고 분사압 5 MPa는 65%의 분포를 나타냈으며, 주 분무 영역과 와운영역에서는 약 13 μm 이하의 액적들이 분사압 1 MPa의 경우 각각 약 71%, 55%, 그리고 분사압 5 MPa는 각각 83%, 70%의 백분율을 나타냈다. 이는 분사압이 증가함에 따라 액적들이 분열에 사용될 수 있는 에너지 역시 증가하기 때문으로 사료된다.

(3) 분무중심 영역보다 분무의 외곽에서 평균액적 직경이 상대적으로 크게 나타나 증공원추형의 분무 형상을 확인할 수 있었다. 또한 분사압이 증가함에 따라 분무선단영역의 축방향 평균속도는 선형적인 증가를 보여 분사압 1MPa에서 7MPa로 증가시키면 약 31%의 증가를 보이지만 와운영역은 약 2% 이내로 오히려 감소하며 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 평균 속도에 대한 분사압의 영향은 분사 말기보다는 분사 초기에 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

(1) Kume. T., Iwamoto. Y., Iida. K., Murakami. M., Akishino. K., and Ando. H. 1996, "Combustion

- Control Technologies for Direct Injection SI Engines," SAE Technical paper. No. 960600.
- (2) Zhao. F.-Q., Yoo. J.-H. and Lai, M.-C., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE Technical paper, No. 961925.
- (3) Zaho. F.-Q., Lai, M.-C. and Harrington. D.L., 1997, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines," SAE Technical paper. No. 970627.
- (4) Harada, J., Tomita, T., Mizuno, H., Mashiki, Z. and Ito, Y., 1997, "Development of a Direct Injection Gasoline Engine," SAE 970540.
- (5) Pontoppidan, M., Gaviani, G. and Marelli, M., 1997, "Direct Fuel-Injection - a Study of Injector Requirements for Different Mixture Preparation Concepts," SAE 970628.
- (6) Cheng, W.K., Hamrin, D., Heywood, J.B., Hochgreb, S., Min, K. and Norris, M., 1993, "An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanics in Spark-Ignition Engines," SAE Technical Paper 9332708.
- (7) Kim, W.T., Kang, S.J. and Rho, B. J., 2000, "Characteristics of the Gasoline Spray near Impinging Wall in Suction Flow," *Transactions of the KSME(B)* Vol, 24 No. 10, pp. 1285 ~ 1293.
- (8) Kim, W.T., Rho, B.J. and Kang, S.J., 2000, "Gasoline Spray Characteristics Impinging onto The Wall Surface in Suction Air Flow," *KSME International Journal*, Vol 14, pp. 1376 ~ 1385.
- (9) Moser, W., Mentgen, D. and Rembold, H., 1997, "Gasoline Direct Injection - a New Challenge for Future Engine Management Systems. part 1," MTZ58 pp. 2~8.
- (10) Lawrence W. Evers, 1994, "Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector," SAE 940188.