

## PFI용 가솔린 인젝터의 비정상 간헐 분무 특성

김 범 준<sup>\*1)</sup> · 이 재 호<sup>1)</sup> · 조 대 진<sup>1)</sup> · 윤 석 주<sup>2)</sup>

전북대학교 기계공학과 대학원<sup>1)</sup> · 전북대학교 자동차 신기술 연구센터<sup>2)</sup>

## Unsteady Intermittent Spray Characteristics of PFI Gasoline Injector

Beomjun Kim<sup>\*1)</sup> · Jaiho Lee<sup>1)</sup> · Daejin Cho<sup>1)</sup> · Suckju Yoon<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Automobile Hi-technology Research Center, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 8 May 2005 / Accepted 13 July 2005)

**Abstract** : The effect of fuel injection spray on engine performance has been known as one of the major concerns for improving fuel economy and reducing emissions. In general, reducing the spray droplet size could prevent HC emission in gasoline engine. As far as PFI gasoline engine is concerned, the mixture of air and fuel may not be uniform under a certain condition, because breakup and production of spray droplets are made in a short distance between the fuel injector and intake valve.

This study, by constituting PFI gasoline spray system, was performed to study the transient spray characteristics and dynamic behavior of droplets from two-holes two-sprays type injector used in DOHC gasoline engine. Mean droplet size and optical concentration in accordance with various conditions were measured by LDPA and CCD camera. Through this study, the variation of drop size and optical concentration could be used for understanding the behavior of unsteady spray was declared and the existing the small droplets between each pulse spray could be estimated caused to the development of wall film was conformed.

**Key words** : LDPA(Laser diffraction particle analyzer), Transient condition(과도 상태), Spray dynamic characteristics(분무 동적 특성), PFI(Port fuel injection)

### 1. 서론

전 세계적으로 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비, 대기 오염, 소음 등의 환경 문제의 대두와 화석 연료의 고갈에 따라 배기가스 저감 및 연비 향상이 자동차 산업에 있어서 중요한 연구 방향이 되고 있다. 특히 엔진 설계는 국제적 공통과제인 환경 문제로 인해 CAFE(Corporate Average Fuel Economy)와 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)등과 같이 갈수록

강화되고 있는 세계 각국들의 자동차 배기 규제에 대응하기 위해 연료 경제성이 뛰어나고 환경오염 물질의 배출이 적은 엔진을 개발하기 위한 방향으로 이루어지고 있다. 더구나 미국에서는 ULEV 규제보다 한층 강화된 SULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle) 및 ZEV(Zero Emission Vehicle) 등의 배출가스 규제가 제안되고 있으며, 유럽을 중심으로 디젤 엔진에 대하여도 한층 엄격한 배기규제가 시행되고 있으나 이러한 규제치를 만족시키기는 매우 어려운 상황이다. 따라서 강화된 배기규제를 만족시킬 수 있는 청정 연소의 저공해 엔진 기술 개

\*To whom correspondence should be addressed.  
kbj1977@hotmail.com

발이 절실히 필요한 실정이며, 엔진의 배기가스 저감 기술은 해결해야 할 가장 중요한 과제로 부각되고 있다. 이러한 요인들을 충족시키기 위해서 엔진 성능을 좌우하는 구성 요소 중 가장 중요한 역할을 차지하는 연료 공급계를 개선하는 시도로서 연료 분사를 전자적으로 제어하여 희박 상태에서 연료를 연소시킴으로써 엔진의 성능 향상 및 연비 개선과 배기가스의 저감을 얻고자 하고 있다.

가솔린 연료 분사 시스템의 하나인 PFI(Port Fuel Injection) 시스템은 흡기 포트 내로 연료 제트를 직접 분사하기 때문에 흡기 포트 내의 연료 액적의 거동은 매우 복잡하고, 액적들 상호간에 충돌 및 합착 등의 과정을 통하여 분열된다. 또한, 연료의 일부는 흡기 포트의 벽면에 충돌하여 유막을 형성하고, 흡기 포트 및 흡기 밸브의 높은 온도에 의해 증발되는 과정을 거치게 된다. 고압분사 방식의 소형엔진이나 포트 연료 분사식 엔진에서는 운전조건에 따라서 분무 액적과 벽면의 충돌현상이 불가피한데, 분무 액적과 벽의 상호작용은 연료와 공기의 혼합 및 연소에 영향을 미치는 가장 중요한 인자중의 하나이다. 분사된 액체연료의 완전한 무화를 위해서는 노즐로부터 일정한 거리가 필요하다. 또한 시동 초기에는 액체 연료가 차가운 흡기 다기관에 부착되고, 액적 상태로 연소실내에 유입되어, 점화 시까지 연소실 벽에 남아있게 된다. 분무액적과 벽의 충돌은 분무 연료의 2차적인 미립화의 유발요인으로, 분무가 벽을 따라 유막을 형성하며 확산되도록 하고, 공기의 유입을 통해 증발과 혼합을 배가시키는 요인이 된다. 그러나 분무액적이 벽에 부딪혀 흡착됨으로써 흡착점 부근에 농후한 혼합기를 형성하여 부분적인 연소가 발생하는 것이 다량의 환경 오염 물질을 방출하는 원인이 되는 것으로 알려지고 있다.<sup>1)</sup>

근래에 많이 이용되고 있는 방법 중의 한 가지인 DOHC(Double Overhead Camshaft)형 기관에서의 인젝터는 설계인자에 따라 포트 내벽과 흡기 밸브의 뒷면에 연료가 부착하는 양이 변하기 때문에 연료의 분사 방향에 따라서는 흡기 포트와 연소실 벽에 부착될 수 있으며,<sup>2,3)</sup> 분사된 연료의 일부가 충분히 미립화 되어 기화된 연료 증기의 상태로 유입되지

못하고, 실린더 내에 직접 유입됨으로써 불완전 연소의 발생빈도를 높이며, 또한 배기물의 배출량을 증가시킨다.<sup>4,6)</sup> 이는 연료 분사 패턴 뿐만 아니라 연료의 분사시기, 분사기간 등의 영향을 많이 받으리라 사료된다.

또한 엔진 시동 시에 분사되는 연료량은 이론혼합을 위해 요구되는 연료의 5배 이상이 되고 이 기간 동안에 공기유량은 적으며 증발은 거의 일어나지 않기 때문에 이 연료의 대부분은 포트내벽, 흡기 밸브, 그리고 실린더 안에 액체 연료의 상태로 남아 있게 된다. Shayler등<sup>7)</sup>은 엔진의 시동 시의 초기 몇 사이클 동안에 과도하게 분사된 연료의 20~30% 정도만이 증기의 형태로 실린더 안에 존재하고, 또한 액체 연료는 정상적이고 과도적인 운전 조건에서도 존재한다고 보고하였다. 이 액체 연료는 액적 상태로 실린더 벽에 충돌하게 되며 피스톤링의 틈새로 들어가게 되는데 Adamezyk등<sup>8)</sup>은 피스톤링의 틈새에서의 미연소 연료가 미연 탄화수소, 즉 UBHC(Unburned Hydrocarbon) 발생의 가장 주된 영향을 미친다고 보고하였다. 또한 Hwang등<sup>9)</sup>은 급가속시 흡기압의 변화에 의해서 분사한 연료량보다 실린더로 유입되는 연료량이 작아지고 그로 인해서 공연비가 희박해진다고 하였다.

포트 연료 분사식 가솔린 엔진에서의 연소 효율을 향상시키기 위해서는 짧은 연소기간 동안 완전한 연소가 이루어지도록 연료 액적의 충분한 미립화 및 미립화가 이루어진 액적이 공기와 혼합기를 형성하여 연소실에 균일한 분포로 유입되도록 하는 과정이 우선적으로 요구된다. 즉 분사기간 동안의 입경의 시간적 변화와 인젝터 주위를 흐르는 흡기의 거동 변동이 조화를 이루어야 한다. 분사된 연료 분무는 공간과 시간에 대해 제한을 받으며 대부분 비정상 상태의 제트에서 분열 생성되는 분무 액적을 이용하기 때문에 기본적으로 분무의 분열 과정에 대한 시간적, 공간적인 명확한 분석과 검토가 필요하다.

Kihm<sup>10)</sup>등은 LDPA(Laser Diffraction Particle size Analyzer)를 동기화시키는 방법을 사용하여 간헐적으로 분사되는 분무의 구조와 발달과정을 분석하였다. Parrish<sup>11)</sup>는 Kihm의 방법을 자동차 연료 분무 측

정에 적용하고자 Malvern 2600 입경측정기를 사용하여 PFI 분무의 주기적인 입경 특성의 동적 거동을 측정하고 정상상태와 주기적 변동 상태에서의 SMD(Sauter Mean Diameter)를 비교하였다. 유사한 연구로 Amer등<sup>12)</sup>은 PDI(Phase Doppler Interferometer)를 사용하여 동종의 PFI 분무의 시간 변화에 대한 입경을 측정하고, 비정상과도 분무 특성은 분사 조건과 인젝터의 내부 구조에 의존된다고 하였다. 또한 분사 전 주기에 걸쳐 입경 정보를 합산함으로써 PDI에 의한 입경의 시간적 분석이 가능함을 밝혔다. Farrel등<sup>13)</sup>은 GDI(Gasoline Direct Injection) 분무의 과도 특성을 연구하면서 LDPA와 디지털 영상 기법과의 결합에 의한 분석을 시도하였다. Robert등<sup>14)</sup>은 GDI 분무의 전 분사 주기에 걸쳐 입경의 시간적 변화 양상을 보기 위하여 2kHz의 높은 시간 분해능을 갖는 LDPA를 사용하였으며 단발 영상과 시간 변화에 의한 입경 측정 정보를 비교하여 분사 주기의 타이밍에 따른 분무 구조와 입경 변화의 연계성을 밝혔다. 최근 Lee등<sup>15)</sup>은 혼합기 형성에서 분무의 영향을 규명하기 위한 새로운 과도적 입경 측정 기법을 시도하고 타당성을 연구하였다.

인젝터의 적합성은 입경 분포, 분무 도달 거리, 분무각등과 같은 분무 특성이 분사시기와 관련하여 측정되는 시각과 공간에 따라 판단되어진다. 따라서 새로운 엔진 개발을 위한 인젝터의 선정과 매칭을 위해서는 분무의 비정상적인 특성에 관한 규명이 절대적으로 요구된다. 이러한 필요성에도 불구하고 지금까지의 연구는 주로 정상 상태의(steady state) 분무 특성에 집중되어 있으며 분사 주기를 고려한 시간 및 공간의 변화에 대응하는 비정상 간헐 분무에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 PFI 분사 시스템에 사용되는 인젝터에서 분사되는 연료 액적의 고속 이미지 촬영을 통한 shadowgraph법을 이용하여 분무의 분열과정을 시간에 따라 규명하고자 한다. 또한 최근 선진국에서 시도한 새로운 측정기법<sup>15)</sup>을 활용하여 비정상 상태의 과도적인 간헐 분무의 연료 입경 특성에 대한 분석을 목적으로 측정 시스템을 구축하고, DOHC용 가솔린 기관에서 널리 사용되고 있는 인젝터인 PFI 엔진용 2 홀 2 분무 인젝터의 비정상

간헐 분무의 특성을 규명하고자 한다.

이러한 연구를 통해 본 연구에서는 실험을 통하여 얻은 결과로 비정상 상태의 과도적인 간헐 분무의 시간과 위치에 따른 주기적인 입경에 대한 정보를 확보함으로써 UBHC등의 배기 성능 악화 원인을 규명할 수 있는 기반을 마련하고자 하며, 최적의 공연 혼합기 달성을 위한 분무의 역할을 규명함으로써 SI엔진의 점화 성능 및 배기 성능을 향상시키고, 계속적으로 강화되고 있는 배기 규제에 대한 대응 및 연료 절감을 만족하는 인젝터의 개발을 위한 기본 자료로 활용하는데 목적이 있다. 또한 엔진 설계 시 최적 연소 조건을 만족하는 정확한 분무의 구조 및 관련 특성을 제공하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서 구성한 실험 장치는 크게 연료 분사 시스템과 분무 입경 측정 장치 및 분무 이미지 획득 장치로 나눌 수 있다.

Fig. 1은 본 실험을 위해 설계·제작한 연료 분사 시스템과 분무 입경 측정 장치 및 이미지 획득 시스템의 전체적인 개략도이다. 연료는 압축 질소에 의해 가압되는 연료 챔버에서 필터를 통해 인젝터로 공급 되도록 하였다. 연료의 분사 압력은 연료 탱크 입구에서 압력 변환기로 측정하며, 압축 질소 분배에 장착된 압력 레귤레이터에 의해 실제 가솔린 엔진에서의 일반적인 분사 압력인 0.3MPa로 설정하였다. 실험에 사용한 인젝터는 Fig. 2(a)에 도시한 사양의 DOHC용 2홀 2분무 타입의 상용 인젝터이고, 인젝터의 구동 신호는 펄스 발생기(DG 535)와 인젝터 솔레노이드 컨트롤러에 의해서 분사 주기와 분사 시간을 제어하였다.

분무의 미시적인 특성인 평균 입경과 입경 분포를 계측하기 위해서 광학적 계측 장치인 LDPA를 사용하여 Fig. 2(b)와 같은 위치에 측정하였다.

레이저 회절 입경 측정 장치는 Sympatec GmbH사의 HELOS /Vario-KF로 출력 5mW, 파장 633nm, 빔의 직경이 13mm의 He-Ne 레이저이고, 1.75~350 $\mu$ m의 입경 측정 범위를 가지고 초점거리가 200mm인 렌즈를 사용하여 실험을 수행하였다. 또한 인젝터

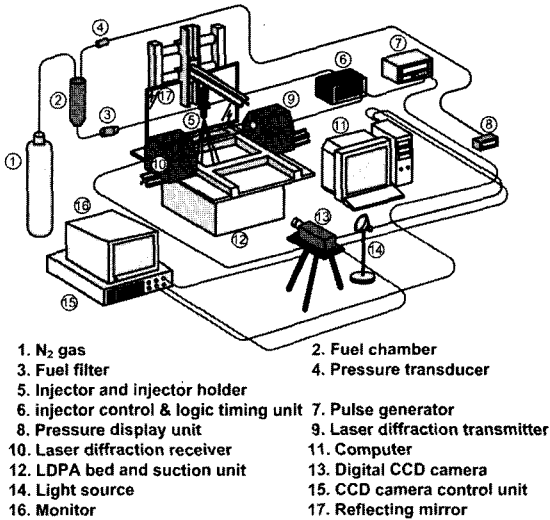


Fig. 1 Schematic of experimental setup

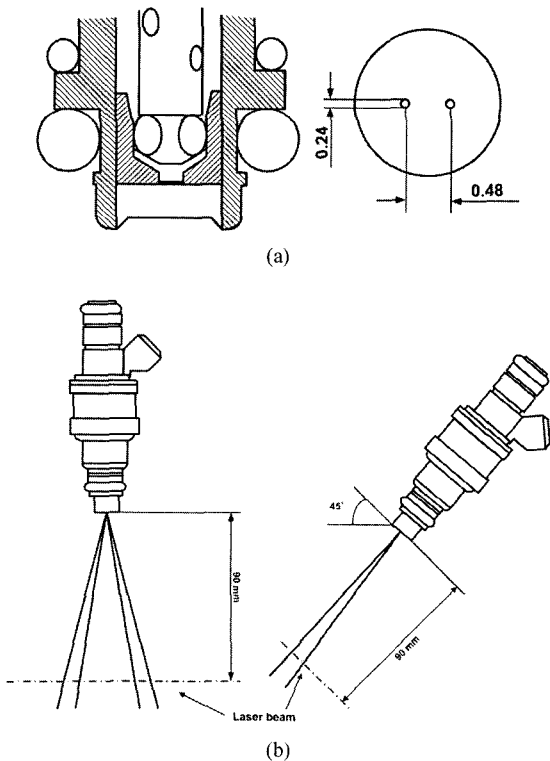


Fig. 2 Configuration of injector and LDPA measuring position

를 구동시키는 펄스의 신호와 동기 된 신호에 의해 인젝터 구동 시작과 동시에 측정이 이루어지도록 하였다. 인젝터에서 발생하는 분류의 분열 현상을

가시화하기 위한 이미지 획득 시스템은 펄스 발생기와 인젝터 컨트롤러에 의해 인젝터를 구동시키고 그 구동 신호와 동기화된 신호에 의해 카메라 컨트롤 유닛이 디지털 CCD카메라를 작동하게 하였다. 디지털 CCD카메라는 Photron사의 Fastcam-ultima 40K를 이용하여 초당 4500프레임의 분해능으로 촬영하였으며, 이미지는 256(V)×256(H)의 해상도로 획득하였다. 광원은 필라멘트 타입으로 카메라와 같은 방향에 위치하였고, 분무의 반대편에 반사판을 설치하여 역광으로 이미지를 획득하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

실험은 분사 개시 후 시간 경과에 따른 액적의 과도적인 거동을 살펴보기 위해서 0.5ms 간격으로 분무 액적의 평균 액적 직경과 크기 분포를 측정 하였다.

측정 위치는 인젝터 팁 선단으로부터 멀어질수록 액적 크기 분포의 거동을 살펴보기 위하여 레이저 빔의 중심이 인젝터 팁 선단으로부터 분무의 흐름 방향으로 각각 30, 50, 70, 90mm인 지점으로 하였으며, 이때의 최대 측정 거리인 90mm는 실제 가솔린 엔진에서 인젝터 팁과 흡기 밸브 사이의 거리를 고려하여 선정하였다. 또한 인젝터의 설치 경사각에 대한 영향을 살펴보기 위하여 수직 하방향과 45°의 두 조건을 선정하여 실험을 수행하였다. 인젝터의 분사조건은 실제 가솔린 엔진의 3,000rpm 회전수일 때의 인젝터 신호 펄스가 30~40Hz인 것을 고려하여, 35Hz일 때의 분사 주기인 40ms로 하다. 이 모든 실험은 흡기 유동이 없이 대기 분사 상태로 실험을 수행하였다. 실험을 위해 선정된 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental condition

Parameter	Condition	
	Fuel	Density
	Dynamic Viscosity	0.0012 N · s/m <sup>2</sup>
Injector type	2holes 2sprays type	
Injector pressure	0.3 MPa	
Injection period	40 ms	
Injection pulse width	8 ms	
Measuring position	30, 50, 70, 90 mm below injector tip	
Injector settling angle	45°, 90°	

### 3. 실험 결과 및 검토

#### 3.1 인젝터의 분사량 특성

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 2 홀 2 분류 타입 인젝터의 분사량 특성을 알아보기 위하여 분사 기간의 변화에 따라 연료의 분사량을 도시한 것이다. 단발 분사로 분사되는 연료량은 그 양이 매우 적기 때문에 동일 분사 기간에서 50회 동안 분사되는 연료량을 메스실린더에 담아 체적을 측정 한 후 질량 유량으로 환산하였다. 1회 분사되어 다음 분사가 이루어지는 분사 주기는 연료 공급 라인에 존재하는 관성에 의한 압축파의 영향을 배제하기 위하여 분사기간에 비해 충분한 시간인 500ms로 하였다. 실험 조건인 분사 기간 4, 6, 8ms에서의 연료량은 각각 8.22, 12.33, 16.44mg으로 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이렇게 얻어진 연료의 분사량은 인젝터의 실제 엔진 적용 시 흡기계와 연계되어 적절한 분사 조건을 규명 하는데 중요한 자료가 될 것이다.

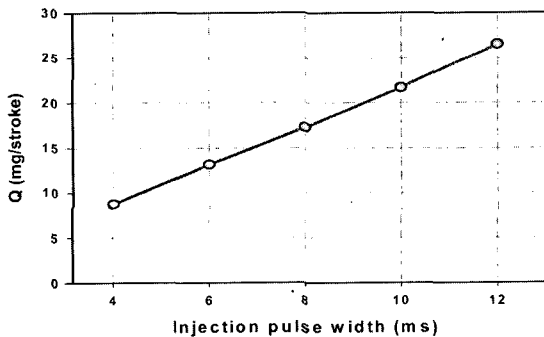


Fig. 3 Flow rate of injector in accordance with pulse width (injection pressure : 0.3MPa)

#### 3.2 비정상 분무의 평균 입경 및 분포

인젝터에서 연료가 단발로 분사 되었을 때 인젝터 팁 선단으로부터 하방 90mm에서 분무의 시간 변화에 따른 비정상 동적 거동을 살펴보기 위하여 분사 기간을 73ms로 충분히 길게 하여 실험을 수행하였다. Fig. 4는 분사 개시 후 시간에 대한 평균 액적 직경(DV50 : 체적 누적치의 50%에 해당하는 입경 또는 질량 중심 입경인 MMD)과 광학적 농도(optical concentration)의 변화를 도시한 것이다.

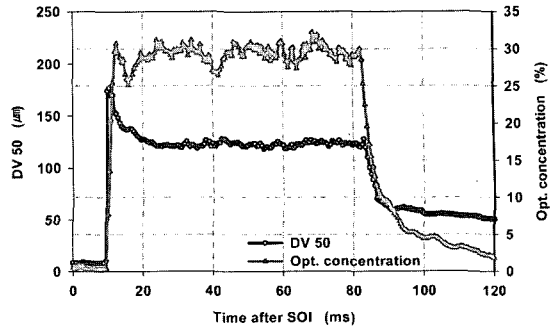


Fig. 4 Time-resolved drop size and optical concentration at 90mm below from injector tip (pulse width : 73ms, injection pressure : 0.3MPa)

분사 개시 후 약 10ms에서 광학적 농도가 증가하는 것으로 보아 분무의 선단이 측정위치에 도달하였음을 알 수 있다. 이때의 평균 직경은 163.58 $\mu$ m이었고, 시간이 지남에 따라 점차적으로 줄어들어 주 분무가 통과하는 시기에는 약 120 $\mu$ m로 일정해짐을 알 수 있다. 또한 광학적 농도 역시 평균직경의 시간에 따른 거동과 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 이는 인젝터의 니들이 분사 개시 후에 갑작스럽게 열리게 되어 인젝터 내부에 있던 연료가 분출되면서 낮은 분사압력으로 인하여 매우 큰 액적들이 존재하지만, 일정 시간이 경과한 후에는 니들이 완전히 열려져 있는 상태에서 분사가 진행되기 때문에 분사 압력이 균일해짐으로써 분무가 정상상태로 발달되어가는 것을 알 수 있다. 그 후 13ms에서는 광학적 농도가 최대에 도달하여 액적의 밀도가 최대인 분무의 선단부가 측정 영역을 통과함을 알 수 있으며, 평균 직경은 분무 내에 존재하는 작은 액적들의 영향으로 점차 감소한다. 17ms에서 광학적 농도가 급격히 저하되는 것은 인젝터 니들이 급격히 열린 후 분사 압력이 안정화되기 전에 주 분무의 선단부가 측정영역에 도달하는 것으로 판단된다. 83ms 이후에서 분사가 종료된 후 90ms까지 측정 영역을 통과하면서 분무 말기에서의 평균직경과 광학적 농도가 감소되어가는 변화를 볼 수 있다. 즉 DV50은 주 분무에서 약 135.49 $\mu$ m이었던 것이 니들이 닫히기 시작한 분무 말기에서 63.88 $\mu$ m로 감소하며, 그 후 부유된 액적들의 지속적인 유입으로 약 50 $\mu$ m 정도로 균일하게 된다.

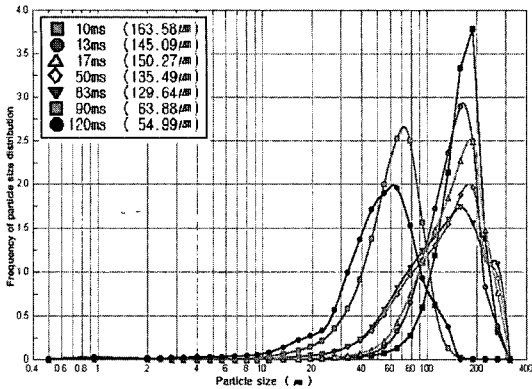


Fig. 5 Drop size distribution of each time delays after SOI

Fig. 5는 분사 개시 후 특정 시간에서의 분무 액적의 크기 분포를 나타낸 것이다.

분무 액적들은 분무 선단이 지나기 시작하는 시점에서보다 그 이후로 갈수록 액적의 분포가 점차 넓어지는 경향을 알 수 있다. 이는 분무 초기에는 비교적 직경이 큰 액적들이 균일하게 분포하지만 분무가 진행 될수록 미립화에 의해 분열된 작은 액적들이 발생되어 측정 위치에 존재하기 때문으로 판단된다.

또한 분무가 완전히 지나간 후인 분사 개시 후 120ms에서는 광학적 농도가 약 4% 이하로 매우 낮지만, 평균 직경이 약 50 $\mu$ m 정도의 액적이 존재하는 것으로 나타났다. 이는 분사 개시 후에 운동량이 작고 크기가 작은 액적들이 측정 위치에 아직 존재하기 때문으로 판단되며, 이 액적들은 시간이 지남에 따라 점차적으로 측정 위치를 벗어나게 되어 그 양이 적어짐을 알 수 있다.

### 3.3 분무 이미지 분석

본 연구에서는 연료의 분열 과정과 분무 형상을 관찰하기 위해서 분사 개시 신호와 동시에 4500fps의 분해능으로 디지털 CCD 카메라를 이용하여 분무 이미지를 연속 촬영하였다. 분사 압력은 0.3MPa, 분사 주기는 40ms, 분사 기간은 8ms의 조건에서 촬영하였다.

Fig. 6~7은 연직 분무의 정면과 45° 기울기의 측면 분무 이미지를 분사 개시 후 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 분사 개시 신호 후 약 1.8ms의 분사

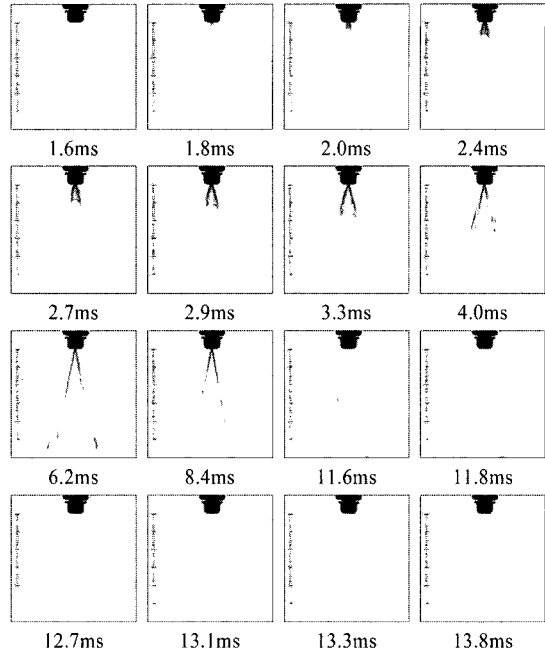


Fig. 6 Spray development with start of injection time in injector (front view)

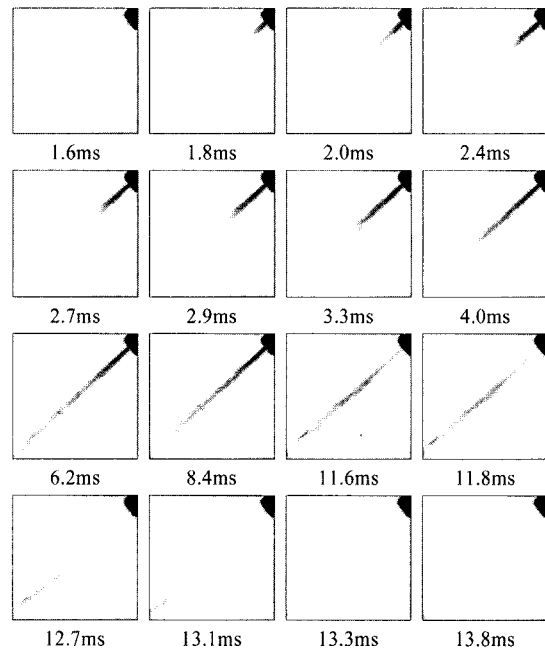


Fig. 7 Spray development with start of injection time in injector (side view, 45°)

지연 시간 후에 분무는 분사되기 시작하고, 분사 초

기에는 두 개의 분무 사이에 간섭현상이 나타나며 시간 경과 후 간섭현상이 약해짐에 따라 2분무로 발달됨을 알 수 있다. 이는 분사 초기에는 이전에 분사되지 못하고 인젝터 내부에 잔류된 연료가 내부 압력과 관성력으로 인해 액주 형태로 단순히 밖으로 밀려나오기 때문이며, 분사 개시 후 시간의 경과에 따라 니들이 상승함으로써 노즐 외부에 분출된 연료에 가해지는 압력에너지의 증가로 인해 연료 분류의 속도가 증가되고 따라서 각각 독립된 분무로 발달되는 것으로 판단된다. 이때부터 분무는 정상적인 주 분류가 발달하기 시작하여 11.8ms까지 지속되다가 니들이 닫히면서 분사 압력이 감소되어 다시 비정상적인 분류로 되어 연료 분류의 직경이 감소하기 시작하며 하류 방향으로의 확산이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

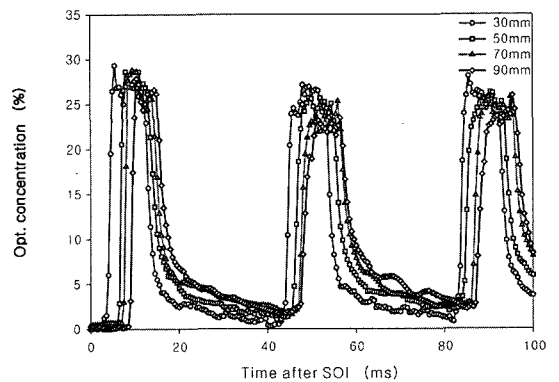
연직 하방으로 분사되는 분무와 45°의 경사를 가지고 분사되는 분무를 비교해보면 수직 방향에 비해 경사를 가지고 있는 분무의 중심축에 대한 대칭성이 낮은 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 분무가 하류로 갈수록 더욱 심해지는 것을 알 수 있다. 이는 분무된 액적에 작용하는 중력의 영향으로 판단되며 운동량이 작고, 크기가 작은 액적들에 이러한 중력의 영향이 더욱 큰 것을 알 수 있다. 따라서 이 액적들은 흡기 포트 밀면이나 밸브 시트에 누적되어 벽면류를 발생시키며 배기 성능 악화의 원인이 될 수 있으리라 판단된다.

### 3.4 측정 위치의 변화

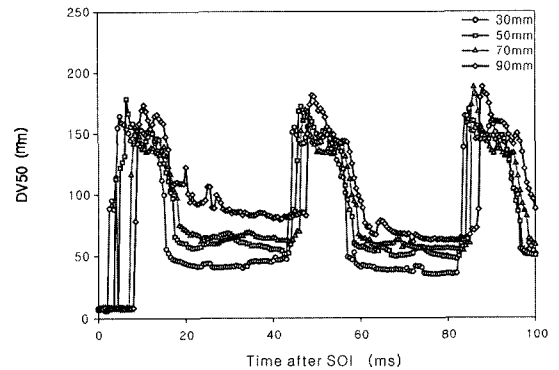
Fig. 8은 분무의 측정 위치를 변화시켰을 때 분사 개시 후 시간 경과에 따른 평균 액적 크기와 광학적 농도의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)에서 광학적 농도는 측정 위치의 변화에 큰 영향을 받지 않고 거의 유사한 형태로 변화하는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 8(b)의 평균 직경을 보면 측정 위치에 따라 다른 경향을 볼 수 있다. 먼저 측정 위치가 팁 선단에서 가까운 30과 50mm에서 첫 번째 분무의 선단이 도달하는 시간의 평균 직경의 변화를 살펴보면 순간적으로 큰 액적들이 지나감을 알 수 있다. 이러한 이유는 앞서 분무의 이미지를 통해서도 확인한 바와 같이 팁 근처에서는 순간적인

니들의 상승으로 인해 미처 미립화가 이루어지지 않은 큰 액적들이 존재하기 때문으로 판단된다. 또한 각각의 분무가 통과한 후를 살펴보면 측정 위치가 팁 선단으로부터 멀리 떨어질수록 측정 위치 내에 잔존하는 액적들의 평균 직경이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 크기가 작은 액적들이 상대적으로 운동량이 작기 때문에 미처 하류까지 이동하기 전에 다음 분무가 시작되었기 때문으로 판단된다.



(a) Optical concentration



(b) DV50

Fig. 8 Optical concentration and mean drop size in accordance with measuring position (pulse width : 8ms, period : 40ms)

Fig. 9는 분무의 측정 위치에 따른 평균 액적의 비교를 위해 선정한 각각의 단계를 보여준다. 각 단계에 대한 정의는 Table 2와 같다. 이러한 정의에 의해 각각의 측정 위치와 선정된 단계에 대한 평균 직경을 Fig. 10에 비교하여 나타내었다. 측정 위치와 판

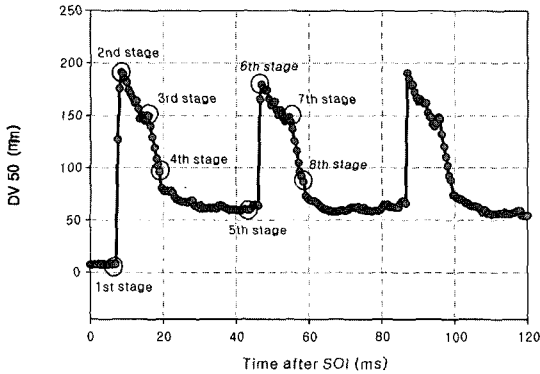


Fig. 9 The stages for mean drop size comparison

Table 2 Definition of designated stage number

Stage No.	Definition
1	The previous of 1st leading spray edge
2	The 1st leading front of the spray
3	The 1st end of steady spray
4	The 1st spray tail
5	The previous of 2nd leading spray edge
6	The 2nd leading front of the spray
7	The 2nd end of steady spray
8	The 2nd spray tail

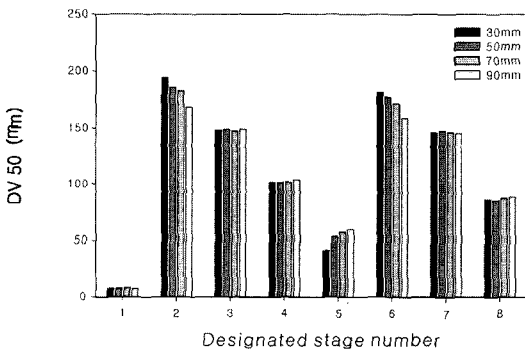


Fig. 10 Mean drop size of designated stage in accordance with measuring position (pulse width : 8ms, period : 40ms)

계없이 첫 번째 분무와 두 번째 분무에서 모두 분무가 발달해 가면서 평균 직경은 모두 감소하는 것을 알 수 있었다. 그리고 첫 번째와 두 번째의 주 분무 선단이 측정위치를 통과하는 단계인 두 번째, 여섯

번째 단계에서는 평균직경이 팁 선단으로부터 멀어질수록 약간씩 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 분무가 시작되면서 팁 선단에서 분사된 액적이 큰 액적들이 하류방향으로 진행되면서 2차 미립화가 이루어지기 때문으로 판단된다. 또한, 다섯 번째 단계인 첫 번째 분무가 측정위치를 통과하고 두 번째 분무가 측정위치에 미처 도달하지 않은 단계에서는 측정 위치가 하류로 진행함에 따라 평균 액적의 직경은 증가하는데 이는 액적들의 운동량 감소로 작은 액적들이 흡착되는데 기인한다고 판단된다.

### 3.5 인젝터 설치 각에 의한 영향

실제 가솔린 기관의 인젝터는 흡기 포트에 약 45°의 경사로 설치되어 분사를 한다. 이러한 실제 조건에서 분사된 액적들의 거동은 액적 크기에 따라 중력의 영향을 받게 되고 흡기 포트의 밑면에 누적되어 벽면류를 형성하게 되어 균일한 혼합기 형성과 연소에 악영향을 미쳐 UHC의 발생과 출력 저하 등의 원인이 된다. 본 연구에서는 인젝터의 설치각을 90°와 45°로 변화시키고, Table 2와 Fig. 9에 정의한 각 단계에서의 분무 액적의 평균 직경의 변화를 Fig. 11과 같이 비교 하였다. 인젝터를 45°의 경사로 설치하여 분사할 때는 실험 장치의 제약으로 두 개의 분류를 모두 측정 위치에 오게 하는데 어려움이 있어서 한 개의 분류만을 측정하고, 수직으로 분사할 때도 동일한 조건으로 실험을 수행하여 측정·비교 하였다.

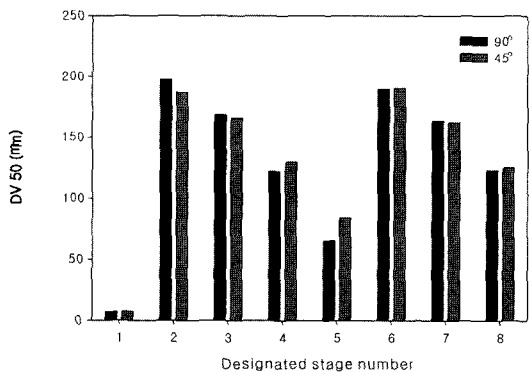
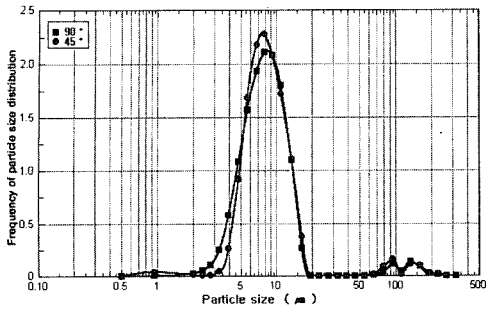
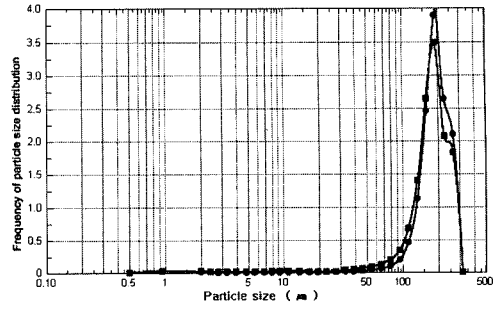


Fig. 11 Mean drop size of designated stage in accordance with injector settling angle (pulse width : 8ms, period : 40ms)

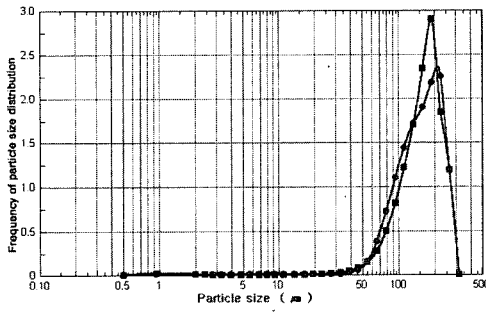




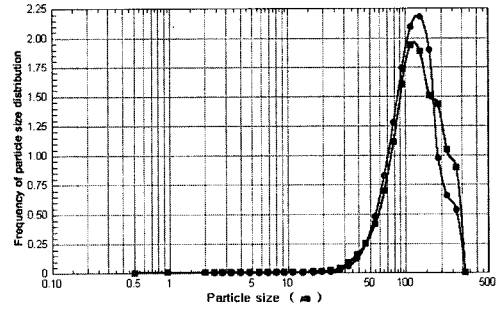
(a) 1st stage



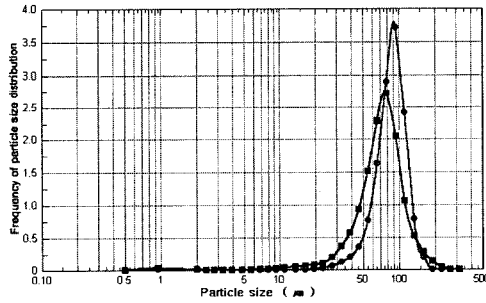
(b) 2nd stage



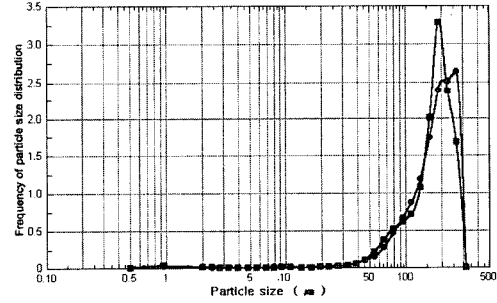
(c) 3rd stage



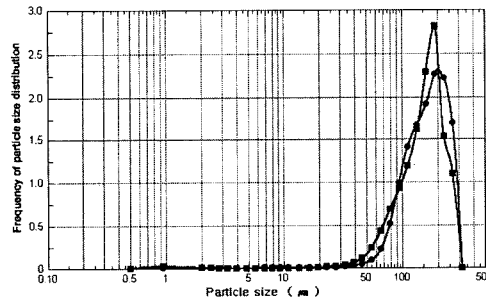
(d) 4th stage



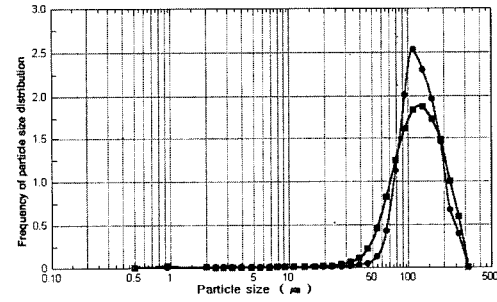
(e) 5th stage



(f) 6th stage



(g) 7th stage



(h) 8th stage

Fig. 12 Particle size distribution of designated stage in accordance with injector settling angle (pulse width : 8ms, period : 40ms)

Fig. 11에 나타난 바와 같이 인젝터의 설치 각을 90°와 45°의 하류 방향으로 실험한 결과 평균 직경의 차이는 각 단계의 영향이 적은 것으로 나타났다. Fig. 12의 분무 액적의 크기 분포에서도 설치각의 영향이 각 단계에서 영향이 작음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 SI 엔진에 사용되는 PFI용 2홀 2분무 타입의 가솔린 인젝터의 간헐적인 분사에서의 과도적인 미립화 특성을 연구하기 위하여 인젝터에서 분사되는 연료 분무의 이미지를 가시화하고, 인젝터 팁 선단으로부터 측정 위치의 변화와 인젝터의 설치 각의 변화에 따른 액적의 평균 직경과 크기 분포를 계측·분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 단발 분사의 경우 분무 초기에는 상대적으로 큰 액적들이 측정위치에 많이 존재하지만, 시간이 경과함에 따라 점차 작은 액적들의 수가 많아지는 것을 알 수 있었고, 분사 종료 후에도 크기가 작고, 운동량이 작은 액적들이 계속해서 측정위치에 잔존해 있음을 알 수 있었다. 그러나 이러한 액적들은 실제 엔진 상황에서는 흡기 포트 내에서 증발되거나 흡입 행정 시 흡입 공기와 혼합되어 실린더 내부로 흡입될 것으로 사료된다.
- 2) 간헐 분사 조건에서 분무의 측정위치를 변화시켜 실험을 수행한 결과 측정 위치가 인젝터 팁 선단으로부터 하류방향으로 멀어질수록 측정 위치 내에 잔존하는 액적들의 평균 직경이 커짐을 알 수 있었고, 각각의 분사에서 액적의 평균 직경은 주 분무 선단, 주 분무 끝단, 분무 말기의 순으로 점차 작아지는 경향을 알 수 있었다.
- 3) 인젝터의 설치각에 의한 영향을 비교하기 위해 실험을 수행한 결과 수직으로 분사를 한 경우와 45°의 경사각으로 분사를 한 경우의 평균 직경의 크기와 분무 도달거리는 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있었다. 하지만, 이미지 분석을 통해 얻은 결과와의 비교를 통해 45°의 경사각으로 분사를 한 경우 운동량이 매우 작은 액적들은 중력의 영향에 의해 분류의 상방향보다 하방향에 더 많이 분포함을 알 수 있었다.

#### References

- 1) Y. Matsui and Sugihara, "Sources of Hydrocarbon Emissions from a small Direct Injection Diesel Engine," JSAE Review, 7, pp.4-11, 1986.
- 2) M. N. Lisa, M. W. Robert, A. D. Drallmeier, "Fuel Droplet Entrainment Studies for Minimization of Cold-Start Wall-Wetting," SAE 950508, 1995.
- 3) T. John and M. Haug, "Spray Formation Observation and Fuel Film Development Measurements in the Intake of a Spark Ignition Engine," SAE 950511, 1995.
- 4) N. Nakamura, K. Nomura and M. Suzuki, "Key Factors of Fuel Injection System to Draw Out Good Response in 4-Valve Engine," SAE 870126, 1987.
- 5) K. Oshiage, Y. Nanyoshi, K. Sawamoto, H. Shigyo, "New Fuel Injection Method for Better Drive-ability," SAE 880420, 1988.
- 6) S. Robert and C. F. Aquime, "Transient A/F Characteristics for Cold Operation of a 1.6 Liter Engine with Sequential Fuel Injection," SAE 880691, 1988.
- 7) P. J. Shayler, R. M. Isaacs and T. H. Ma, "The Variation of In-Cylinder Mixture Ratios During Engine Cranking at Low Ambient Temperatures," IMech, Journal of Automobile Engineering, Vol.2, pp.572-578, 1992.
- 8) A. A. Adamezyk, E. W. Kaiser, and G. A. Lavoic, "A Combustion Bomb Study of the Hydrocarbon Emissions from Engine Crevice," Combustion Science and Technology, Vol.33, pp.261-277, 1983.
- 9) S. Hwang, Y. Cho, J. Lee, "A Study on Fuel Transport Characteristics in a Port Fuel Injected SI Engine during Transient Condition," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.20-27, 2003.
- 10) K. D. Kihm and J. A. Caton, "Synchronization of a Laser Diffraction Sizing Technique with Intermittent Spray Systems," Applied Optics, Vol.31, No.12, pp.1914-1916.
- 11) S. Parrish, "Spray Characteristics of Compound Silicon Micro Machined Port Fuel Injector

- Orifices,” M. S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Michigan Technological University, 1993.
- 12) A. A. Ame and M.-C. Lai, “Time-resolved Measurements in Transient Port Injector Sprays,” SAE 950509, 1995.
  - 13) S. Parrish and P. V. Farrel, “Transient Spray Characteristics of a Direct Injection Spark Ignited Fuel Injector,” SAE 970629, 1997.
  - 14) D. Robert, S. Breuer, W. Reckers, R. Kneer, “Assessment of Pulsed Gasoline Fuel Sprays by Means of Qualitative and Laser-based Diagnostic Methods,” 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 2000.
  - 15) L. E. Markle, D. L. S. Hung, W. A. Humphrey, D. M. Chmiel, C. A. Ospina and F. E. Brado, “A Novel Transient Drop Sizing Technique for Investigating the Role of Injector Spray in Fuel Mixture Preparation,” SAE 2004-01-1349, 2004.