

가솔린 엔진용 2홀 2분류와 4홀 2분류 타입 인젝터의 액적 평균 직경의 동적 거동 비교

김범준* · 조대진** · 윤석주†

Comparison of Dynamic Behavior of Droplet Mean Diameter with 2holes-2sprays and 4holes-2sprays Types Injector for Gasoline Engine

Beomjun Kim, Daejin Cho, Suckju Yoon

Key Words: LDPA(Laser Diffraction Particle Analyzer), Transient Spray Characteristics(과도 분무 특성), PFI(Port Fuel Injection), Mean Droplet Size(평균 직경), Optical concentration(광학적 농도)

Abstract

The influence of fuel spray characteristics on engine performance has been known as one of the major concerns to improve fuel economy and to reduce exhaust emissions. In general, the UBHC (Unburned Hydrocarbon) emission could be reduced by decreasing the droplet size of the fuel sprays. In PFI (Port Fuel Injection) gasoline engines, the mixture of air and fuel would not be uniform under a certain condition, because the breakup and production of spray droplets are made in a short distance between the fuel injector and intake valve sheat. In this study, were investigated the transient spray characteristics and dynamic behavior of droplets from 2holes-2sprays and 4holes-2sprays type injectors used in PFI gasoline engine.

Mean droplet size and optical concentration were measured by LDPA (Laser Diffraction Particle size Analyzer). The variation of droplet mean diameter and optical concentration were measured for understanding the behavior of unsteady spray.

1. 서 론

근래의 자동차 산업에서는 전 세계적인 지구 온난화와 오존층의 파괴, 산성비 등의 환경문제의 대두와 화석연료의 고갈에 따라 배기가스의 저감 및 연비의 향상이 중요한 과제로 인식되고 있다. 또한 CAFE (Corporate Average Fuel

Economy)와 SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle)등과 같이 갈수록 강화되고 있는 세계 각국들의 자동차 배기 규제에 대응하기 위해 연료의 경제성이 뛰어나고 환경오염 물질의 배출이 적은 엔진을 개발하기 위한 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 따라서 강화된 배기 규제를 만족시킬 수 있는 저공해 엔진 기술의 개발이 절실한 실정이다. 이러한 요인들을 충족시키기 위해서 엔진 성능을 좌우하는 구성 요소 중 가장 중요한 역할을 차지하는 연료 공급계를 개선하는 시도로서 연료 분사를 전자적으로 제어하여 엔진의 성능 향상 및 연비 개선과 배기가스의 저감을 얻고자 하고 있다.

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 TIC

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학과

E-mail : mecysj@chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2324

가솔린 엔진 시스템에는 PFI와 GDI 분사 시스템이 있으며, 현재 사용 중인 대부분의 가솔린 기관은 PFI 분사 시스템을 사용한다. PFI 분사 시스템은 흡기 포트 내로 연료 제트를 직접 분사하기 때문에 흡기 포트 내의 연료 액적의 거동이 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. 이러한 과정에서 분무 액적이 벽에 부딪혀 흡착됨으로써 흡착점 부근에 농후한 혼합기를 형성하여 부분적인 연소가 발생하는 것이 다량의 환경 오염물질을 방출하는 원인이 되는 것으로 알려지고 있다.⁽¹⁾

근래에 많이 이용되고 있는 방법 중의 한 가지인 DOHC (Double Overhead Camshaft) 형식의 기관에서 인젝터는 설계인자에 따라 포트 내벽과 흡기 밸브의 뒷면에 연료가 부착하는 양이 변하기 때문에 연료의 분사 방향에 따라서 흡기 포트와 연소실 벽에 부착될 수 있으며^(2,3), 또한 분사된 연료의 일부가 충분히 미립화 되어 기화된 상태로 유입되지 못하고, 실린더 내에 직접 유입됨으로써 불완전 연소의 발생빈도를 높이며, 또한 배기물의 배출량을 증가 시킨다.^(4,6)

포트 연료 분사식 가솔린 엔진에서의 연소 효율을 향상시키기 위해서는 짧은 연소기간 동안 완전한 연소가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 연료 액적의 충분한 미립화와 미립화가 이루어진 액적이 공기와 혼합기를 형성하여 연소실에 균일한 분포로 유입되도록 하는 과정이 중요하다. 즉 분사기간 동안의 분무 입경의 시간적 변화와 인젝터 주위를 흐르는 흡기의 거동 변동이 조화를 이루어야 한다. 분사된 연료분무는 공간과 시간에 대해 제한을 받으며 대부분 비정상 상태의 제트에서 분열 생성되는 분무 액적을 이용하기 때문에 기본적으로 분무의 분열 과정에 대한 시간 및 공간에 대한 명확한 분석과 검토가 필요하다. 이러한 연구로 최근 Lee 등⁽⁷⁾은 혼합기 형성에서 분무의 영향을 규명하기 위해 레이저 회절 원리를 이용한 광학적 입경 측정 장비를 사용하여 새로운 과도적 입경 측정 기법을 시도하고 타당성을 연구하였다.

인젝터의 적합성은 입경 분포, 분무 도달 거리, 분무각등과 같은 분무 특성이 분사시기와 관련하

여 측정되는 시간에 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 시간의 변화에 대응하는 비정상 간헐 분무에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 PFI 분사 시스템에 사용되는 인젝터에서 분사되는 연료 액적의 비정상 상태의 과도적인 간헐 분무의 연료 입경 특성에 대한 분석을 목적으로 측정 시스템을 구축하고, PFI의 분사 시스템에서 널리 사용되고 있는 인젝터인 2홀-2분류, 4홀-2분류 타입 인젝터의 비정상 간헐 분무의 특성을 비교하고자 한다. 또한 본 연구에서는 실험을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 인젝터 타입과 분사 압력의 설정에 따른 비정상 상태의 과도적인 간헐 분무의 시간에 따른 입경 정보를 확보함으로써 UBHC (Unburned Hydrocarbon) 등의 배기 성능 악화 원인을 규명할 수 있는 기반을 마련하고자 한다. 이를 통해 계속적으로 강화되고 있는 배기 규제에 대한 대응 및 에너지 절약을 만족하는 인젝터의 개발을 위한 자료 획득의 방법 및 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험을 위해 설계·제작한 연료 분사 시스템과 분무 입경 측정 장치의 전체적인 개략도이다. 연료는 압축 질소에 의해 가압되어 필터를 통해 인젝터로 공급되도록 하였다. 연료의 분사 압력은 연료 탱크 입구에서 압력 변환기로 측정되며, 압축 질소 봄베에 장치된 압력 레귤레이터에 실험 조건에 맞는 압력으로 설정된다. 인젝터의 구동신호는 펄스 발생기와 (DG 535) 인젝터 솔레노이드 컨트롤러에 의해서 분사주기와 분사 기간을 제어하였다.

분사된 연료의 평균 입경의 계측은 광학적 계측 장치인 LDPA (Laser Diffraction Particle Analyzer, Sympatec GmbH사의 HELOS/Vario -KF)를 사용하였고, 이는 출력 5 mW, 파장 633 nm,

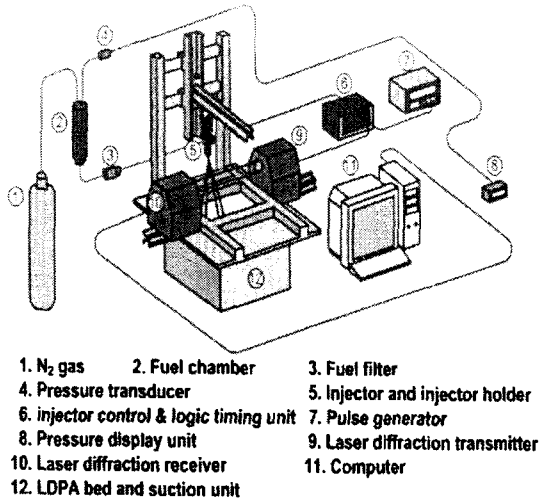


Fig. 1 Schematic of experimental setup

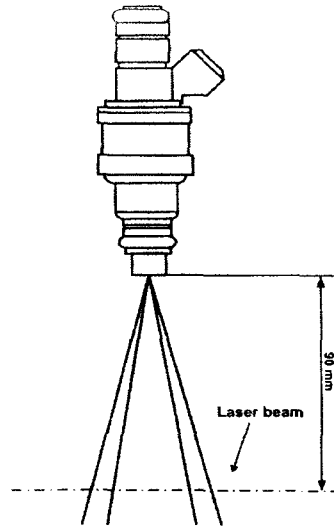


Fig. 3 Measuring position

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Condition	
Fuel	Density	780.1 kg/m ³
	Dynamic Viscosity	0.0012 N·s/m ²
Injector type	2holes-2sprays, 4holes-2sprays	
Injection pressure	0.3, 0.6, 0.9 MPa	
Injection period	40 ms	
Injection pulse width	8 ms	
Measuring position	90 mm below injector tip	

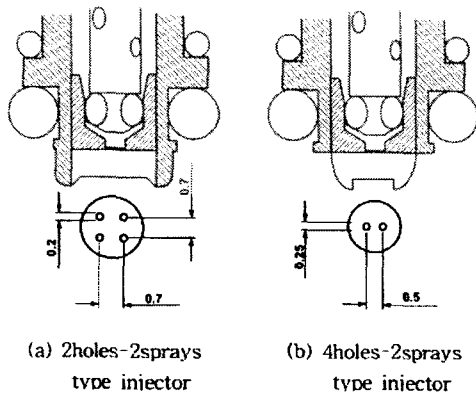


Fig. 2 Configuration of injectors

빔의 직경이 13 mm의 He-Ne 레이저이고, 초점거리가 200 mm인 렌즈를 사용하여 1.75 ~ 350 μm의 측정 범위에서 실험을 수행하였다. 또한, 인젝터를 구동시키는 신호와 동기된 신호에 의해서 인젝터 구동 시작과 동시에 측정이 이루어지게 하였다. 또한 데이터의 획득은 0.5ms의 time resolution으로 설정하여 평균 액적 직경과 광학적 농도를 측정하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 인젝터의 개략도이다.

2.2 실험조건 및 방법

실험은 분사 개시 후 시간 경과에 따른 액적의 파도적인 거동을 살펴보기 위해서 0.5 ms 간격으

로 분무 액적의 평균 직경을 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 3에 도시한바와 같이 인젝터 팁과 흡기 밸브 사이의 거리를 고려하여 레이저빔 단면의 중심선이 인젝터 팁 선단으로 부터 하류 방향으로 90 mm 떨어진 지점을 기준으로 하였다. 두 타입의 인젝터에서 모두 2분류 형태로 분사되므로 측정 위치의 선정은 같게 하였다. 인젝터의 분사 조건은 실제 가솔린 엔진의 3,000 rpm 회전수일 때 인젝터의 신호펄스가 30 ~ 40 Hz인 것을 고려하여, 25 Hz일 때의 분사주기인 40 ms로 하였다. 연료의 분사 압력은 실제 가솔린 기관의 0.3 MPa를 기준으로 분사 압력의 영향을 살펴보기 위하여 각각 0.6, 0.9 MPa의 조건을 추가하여 실험을 수행하였다. 인젝터는 상용 2홀-2분류, 4

홀-2분류 타입의 인젝터를 사용하여 각각의 타입에 따른 분무 액적 직경의 동적 거동을 비교하였다. 실험에 사용된 연료는 실제 차량에 적용되는 가솔린 연료와 물성치가 유사한 16BR calibration fluid를 사용하였다. 기타 실험의 조건은 Table 1과 같다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 인젝터의 분사량 특성

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 2홀-2분류 타입의 인젝터와 4홀-2분류 타입 인젝터의 분사량 특성을 알아보기 위하여 분사 기간의 변화에 따라 연료의 분사량을 도식한 것이다. 1회 분사 연료량은 그 양이 매우 적기 때문에 동일 분사 기간에서 50회 동안 분사되는 연료의 체적 유량을 메스 실린더를 통해 측정 후 질량 유량으로 환산하였다. 1회 분사되어 다음분사가 이루어지는 분사 주기는 연료 공급 라인에 존재하는 관성에 의한 압축파의 영향을 배제하기 위하여 분사기간에 비해 충분히 긴 시간인 500 ms로 하였다. 모든 타입의 인젝터에서 분사기간이 증가함에 따라 분사량이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 분사 압력이 증가할수록 유량 또한 증가하고, 이러한 분사압력의 영향의 분사 기간이 증가할수록 더욱 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 2홀-2분류, 4홀-2분류 타입 인젝터의 순서로 분사되는 연료의 유량이 증가되며, 이는 인젝터에서 연료가 분사되는 홀의 총면적의 차이 때문으로 사료된다.

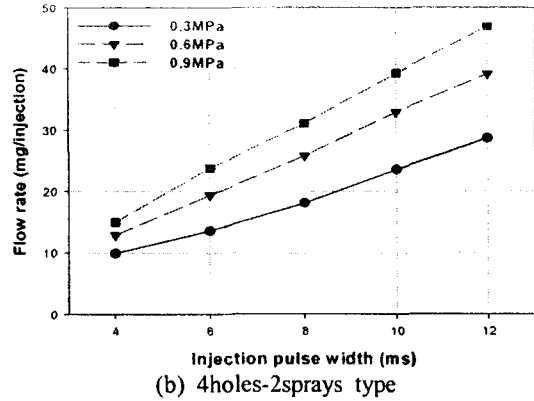
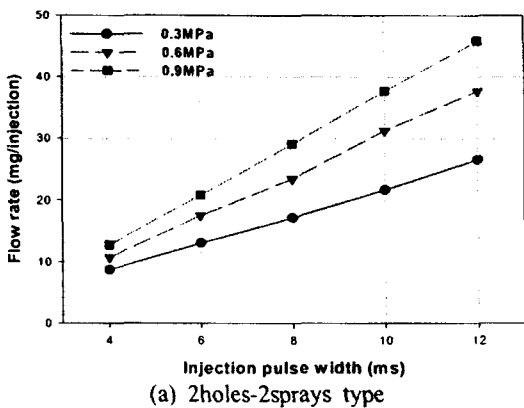
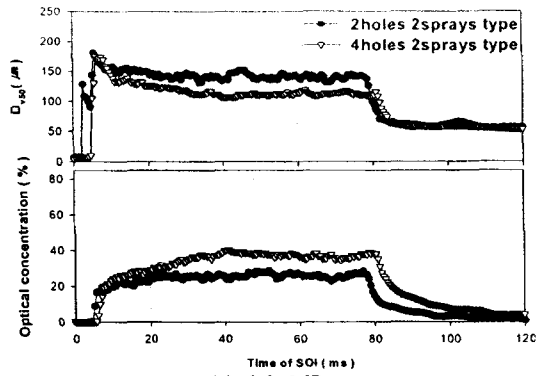


Fig. 4 Flow rate in accordance with injector type

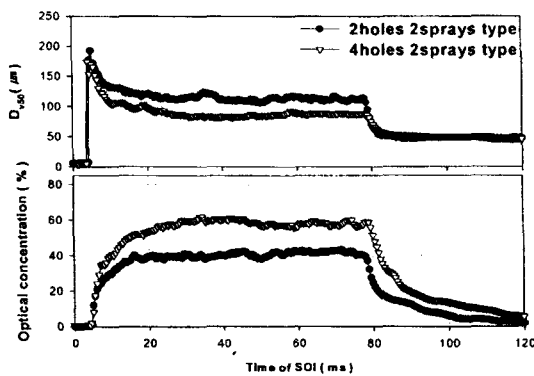
3.2 정상 상태 분무에서의 액적 크기 변동

인젝터에서 연료 분무가 정상 상태로 발달되었을 때 연료 액적 크기의 분사 개시 후 시간 경과에 따른 평균 액적의 크기 변동과 광학적 농도의 비정상 특성을 살펴보기 위하여 분사기간을 분무가 정상 상태로 발달할 수 있는 충분히 긴 시간인 73 ms로 분사 기간을 정하여 0.3, 0.6, 0.9 MPa의 분사압력으로 실험을 수행하였다. Fig. 5는 이 실험의 결과로 분사 개시 후 시간 경과에 따른 평균 액적 직경 (Dv50 : 체적 누적치의 50%에 해당하는 입경 또는 질량 중심 입경인 MMD)과 광학적 농도 (Optical concentration)의 변화를 도식한 것이다. 타입에 상관없이 분사 개시 후 약 8 ms에서 두 타입의 인젝터 모두 광학적 농도와 액적의 평균 직경이 급격히 증가하는 것으로 보아 분사 개시 후 인젝터 텀으로부터 분사된 연료 분무의 선단이 측정위치에 도달하기까지의 시간이 같은 것을 알 수 있다. 분무의 선단이 측정위치에 도달하여 급격히 증가된 평균 직경과 광학적 농도는 시간이 지남에 따라 점차 분무가 정상 상태로 안정되어 주 분무가 통과하는 시기에는 평균 직경이 줄어 일정한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 분무가 정상상태로 진행되고 있음을 의미한다.

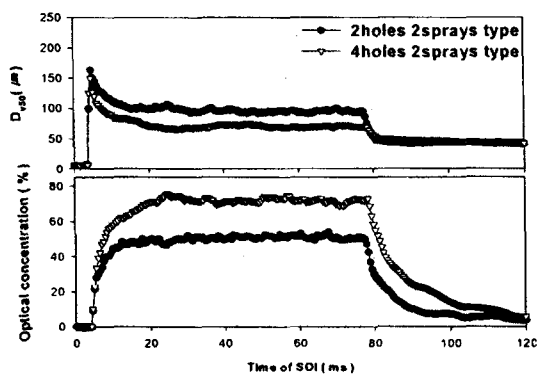
광학적 농도 특성에서도 분사 개시 신호 후 8 ms에 분무의 선단이 측정위치에 도달하는 것을 재확인할 수 있었다. 또한 2홀-2분류 타입의 인젝터는 4홀-2분류 타입의 인젝터에 비해 빠르게 정상 분무로 발달되어 측정 영역에 존재하는 액적의 양이 일정해지는 반면에 4홀-2분류 타입의 인젝터는 약 40 ms까지 지속적으로 측정 영역 내에



(a) 0.3 MPa



(b) 0.6 MPa



(a) 0.3 MPa

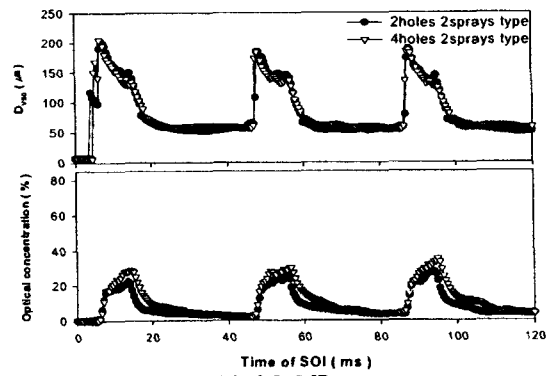
Fig. 5 Time-resolved mean droplet size and optical concentration in accordance with injector type (pulse width : 73 ms)

존재하는 액적의 양이 증가하고 그 이후에 정상 상태로 발달되는 것을 볼 수 있다. 이는 2홀-2분류 타입의 인젝터는 일정한 출구각을 갖도록 뚫린 두 개의 홀을 통해 연료가 분사되어 압력 무화의 미립화 특성을 갖는 두 분류를 발생시키는

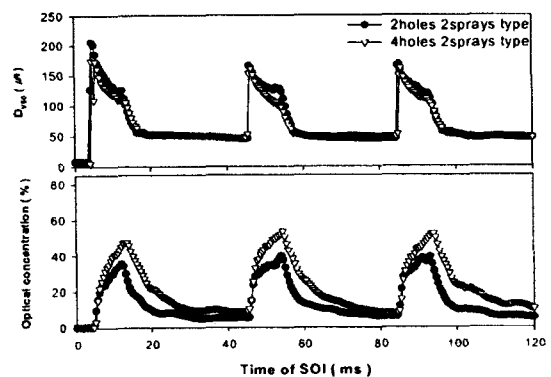
반면에 4홀-2분류 타입의 인젝터는 네 개의 홀을 통해 연료가 네 개의 분류로 분사되어 각각 두 개의 분류씩 충돌 무화를 한 후 두 개의 분류로 되기 때문에 서로 충돌이 일어난 액적의 운동량 감소와 상대적인 분무 액적수의 증가에 의해서 측정 영역에 존재하는 연료 액적의 양이 많기 때문으로 사료된다. 이러한 이유로 인젝터의 홀이 단히 인젝터에서의 분사가 종료된 후에 측정 영역에 도달하는 연료 분무의 끝단에서도 4홀-2분류 타입의 인젝터에서 분사된 연료에서도 광학적 농도의 감소 기울기가 2홀-2분류 타입에서보다 상대적으로 작게 나타났다.

전체적으로 4홀-2분류 타입의 인젝터에서 분사되는 연료 액적이 2홀-2분류 타입보다 우수한 미립화 특성을 보였고, 분무 말기에는 4홀-2분류 타입이 2홀-2분류 타입보다 측정 영역을 통과하는 액적들의 운동량이 상대적으로 작기 때문에 동일 시간대에 많은 액적이 존재함을 알 수 있었다.

3.3 간헐 분무에서의 액적 크기 변동



(a) 0.3 MPa



(b) 0.6 MPa

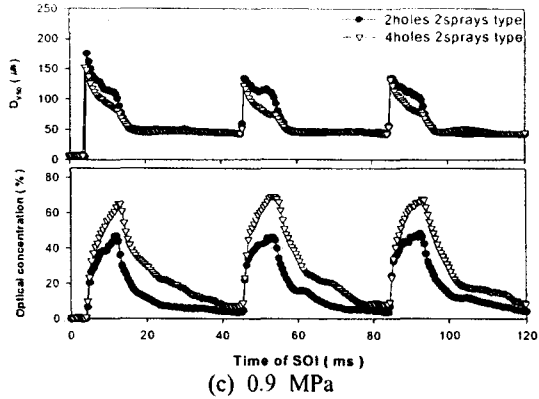


Fig. 6 Time-resolved mean droplet size and optical concentration in accordance with injector type at intermittent spray (pulse width : 8ms, period : 40ms)

Fig. 6은 분사 주기 40 ms, 분사 기간 8 ms로 주기적인 간헐 분무에서의 분사 압력의 변화에 따른 액적의 평균 직경과 광학적 농도를 각각의 인젝터에 따라 나타낸 것이다.

간헐 분무에서도 정상 분무의 경우와 유사하게 분무의 선단이 측정 위치를 통과하는 시간은 약 8 ms로 나타났다. 또한 분사 압력이 0.3 MPa인 경우인 Fig. 6(a)를 보면 분사 개시 후 분무 선단에서 두 타입 모두 순간적으로 액적 크기의 변동 현상이 보인다. 이는 첫 번째 분무에서 인젝터의 홀 내에 잔존하고 있던 연료의 분출에 의한 액적으로 판단된다. 이러한 현상은 분사 압력이 높아질수록 사라지는 것을 볼 수 있다.

분무의 선단부가 측정 영역에 도달하는 시기에 평균 액적 직경이 최대가 된다. 이는 니들의 개방에 따라 연료를 분사하는 압력이 순간적으로 변동하여 충분히 미립화를 이루지 못하기 때문으로 사료된다. 그 이후 분사 압력의 작용으로 미립화가 향상되다가 분무 말기에 도달하게 된다. 분무 말기에 두 타입의 인젝터 모두에서 액적의 크기 변동이 순간적인 상승을 보이는데 이것은 니들의 닫힘에 의한 순간적인 연료의 분출구 면적의 감소로 발생하는 현상으로 사료된다. 이러한 현상은 분사 압력이 높아질수록 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 분사 압력이 증가할수록 인젝터의 연료 분출구 면적의 영향이 상대적으로 적어짐을 알 수 있다.

간헐 분무에서는 첫 번째 분사되는 분무 선단

의 최대 평균 직경이 다음에 연속적으로 분사되는 분무에서의 경우보다 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 인젝터의 니들이 순간적으로 열리는 순간 연료의 관성에 의한 영향으로 판단된다.

광학적 농도를 살펴보면 측정값이 분사 개시 후 점차적으로 증가하다가 니들이 닫힌 이후에는 다시 감소하는 경향을 보이며, 단발 분사의 경우와 같이 그 값이 일정하게 되는 영역이 나타나지 않는다. 이는 분사 기간이 너무 짧기 때문에 분무가 정상 상태로 충분히 발달하기 이전에 분사가 중단되기 때문이다.

또한 분무의 끝단이 통과하는 지점에서는 광학적 농도의 감소 기울기가 정상 분무의 경우와 마찬가지로 4홀-2분류 타입 인젝터의 경우가 2홀-2분류 타입보다 작게 나타난다. 이는 앞서 정상 분무의 경우에서와 같은 이유로 사료된다. 이러한 경향은 분사 압력이 높아질수록 더욱 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 분사 압력이 높아질수록 두 인젝터에서 분사되는 연료량의 차이가 더욱 커지기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

또한, 분사 압력이 높아질수록 정상 분무의 경우와 같이 전체적인 분무 평균 액적의 크기는 작아지고, 광학적 농도는 높아지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 PFI 가솔린 엔진용 인젝터의 비정상 간헐 특성 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

연료 분무가 정상상태로 발달할 수 있게 분사 주기를 충분히 길게 하여 단발로 분사하여 실험한 결과는 다음과 같다.

- 1) 2홀-2분류 타입의 인젝터보다 4홀-2분류 타입의 인젝터의 미립화 성능이 더욱 우수하다.
- 2) 분사 개시 후 정상상태의 분무로 발달되기까지의 경과 시간은 4홀-2분류 타입의 인젝터가 2홀-2분류 타입의 인젝터보다 상대적으로 길다.

두 가지 인젝터 타입에서 분사 압력을 변화시켜 간헐적인 분사 실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 주기적인 간헐 분사의 경우 분사 압력이 증

가할수록 분무 선단이 측정위치에 도달하는 순간 액적의 순간적인 변동 현상은 사라진다.

2) 첫 번째 분무의 선단의 최대 평균 액적의 직경은 다음에 연속되는 분무들의 경우보다 상대적으로 크게 나타난다.

3) 2홀-2분류 타입의 인젝터에서 분무 말기에 니들의 닫힘 현상으로 순간적인 평균 액적의 크기 증가 현상이 발생된다.

분사 압력의 영향으로는 분사 압력이 증가할수록 전체적인 미립화 특성은 개선되고 분무 말기의 평균 액적 크기가 감소되는 시간이 증가하게 된다.

후 기

본 연구는 “2002년도 전북대학교 해외 연구단체 연구비 지원”으로 이루어졌으며, 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Y. Matsui and Sugihara, “Sources of Hydrocarbon Emissions from a small Direct Injection Diesel Engine,” JSAE Review, 7, 1986, pp. 4~11.
- (2) N. M. Lisa, M. W. Robert and A. D. James, “Fuel Droplet Entrainment Studies for Minimization of Cold-Start Wall-Wetting,”

SAE Paper, No. 950508, 1989.

- (3) T. Johne and M. Haug, “Spray Formation Observation and Fuel Film Development Measurements in the Intake of a Spark Ignition Engine,” SAE Paper, No.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 Paper, No.870126, 1987.
- (5) K. Oshiage, Y. Nanyoshi, K. Sawamoto and H. Shigyo, “New Fuel Injection Methode of Better Drive-ability,” SAE Paper, No.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 Paper, No.880691, 1988.
- (7) Lee E. Markle, David L. S. Hung, William A. Humphrey, David M. Chmiel, Carlos A. Ospina and Francis E. Brado, “A Novel Transient Drop Sizing Technique for Investigating the Role of Injector Spray in Fuel Mixture Preparation,” SAE technical paper 2004-01-1349, 2004.
- (8) B. Kim, J. Lee, D. Cho and S. Yoon, “Unsteady spray characteristics of two-holes two-sprays type injector in PFI gasoline engine,” Journal of ILASS-Korea Vol. 10, No. 1, 2005.