

## 커먼레일 직접분사(CRDi)용 고압 디젤인젝터의 구동방식별 Pilot Spray 특성비교 (I)

– 실제 직접분사식 디젤엔진에서의 사전분사 특성 분석 –

이 진 육<sup>†</sup>

### Comparison of Pilot Spray Characteristics of HP Diesel Injectors with Different Driving Method for CRDi System (I)

Jin Wook Lee

**Key Words:** Common-rail System(커먼레일 시스템), Pilot Spray(사전분사), Solenoid-driven Injector(솔레노이드 구동 방식 인젝터), Piezo-driven Injector(피에조 구동방식 인젝터)

#### Abstract

The capability of pilot injection with small fuel quantity at all engine operating conditions is one of the main feature of the common rail direct injection system. The purpose of the pilot injection is to lower the engine noise and to reduce the NOx emissions. This study describes the pilot spray structure characteristics of the common-rail diesel injectors with different electric driving characteristics, including solenoid-driven and piezo-driven type. Namely three common-rail injectors with different electric current wave were investigated in this study. The pilot spray characteristics such as spray speed, spray tip penetration, and spray angle were obtained by spray images, which is measured by the back diffusion light illumination method with optical system for high-speed temporal photography. As this research results, it was found that pilot injection of common-rail system was effected by rate of injection with different electrical characteristic for driving the injector.

#### 기호설명

TDC: Top dead center

CRDi: Common-rail Direct Injection (커먼레일 직접분사)

ID<sub>M</sub> : Main injection duration (주 분사 기간)

ID<sub>P</sub> : Pilot injection duration (사전분사 기간)

Q<sub>M</sub> : Main fuel quantity (주 분사 연료량)

Q<sub>P</sub> : Pilot fuel quantity (사전분사 연료량)

P<sub>i</sub> : Pressure of fuel injection [bar]

P<sub>c</sub> : Cylinder Pressure [bar]

#### 1. 서 론

글로벌 온난화규제가 본격화되면서 자동차 산업은 기술과 정책에 대한 새로운 각도에서 재평가 필요성이 제기되고 있는 실정이다. 이러한 맥락의 일부로, 향후 발효될 자동차 CO<sub>2</sub> 규제에 대비하여 디젤엔진에 대한 사회적 인식의 전환과 첨단엔진 기술개발이 요구되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 커먼레일을 적용한 초고압 직분식(direct injection) 디젤엔진은 이와 같은 환경규제에 대응하기 위하여 세계 주요 선진국 및 자동차회사에서 치열한 기술개발 경쟁을 벌이고 있는 첨단 친환경엔진이며, 가솔린 엔

(2010년 1월 6일 접수~2010년 3월 8일 심사완료, 2010년 3월 9일 게재확정)

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 숭실대학교 기계공학과

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02)820-0929 FAX : (02)820-0668

진에 비해 연료절감 및 CO<sub>2</sub> 배출감소 효과가 큰 것으로 알려져, 최근에 이에 대한 새로운 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(3,4)</sup>.

이러한 직접분사식 디젤엔진에 적용되는 커먼레일(common-rail) 시스템의 주된 특징은 엔진회전수와 관계 없이 인젝터의 연료공급압력을 제어하여 사전분사(pilot injection)를 통한 엔진소음 및 NOx 저감을 할 수 있다는 것이다. 또한 이후에 발생하는 연소장내에서 전개되는 주분사에 지대한 영향을 끼치게 된다. 즉, 연소실내 가연범위로 혼합된 연료-공기 혼합물의 점화지연기간이 짧아져 빠르게 연소가 일어나게 되며, 연료액적의 증발 시간도 짧아짐<sup>(5,6)</sup>과 동시에 연소실내에서의 급격한 연소압력의 증가를 방지할 수 있다.

따라서 본 연구는 짧은 시간 내 소량의 연료를 사전 분사하는 커먼레일 시스템에 사용되는 고압 디젤인젝터의 서로 다른 구동방식별로, 연소장 형성 이전에 발생하는 사전분사(pilot spray)의 특성을 정량적으로 비교·분석하고자 수행하였다. 이를 위해서, 실제 다단 연료분사에 의한 디젤엔진 특성을 구체적으로 파악하고자, 실제 직접분사식 디젤엔진 실험을 통해 사전분사 특성을 규명한 결과를 본 논문에 기술하고자 한다.

아울러서 추후 이를 바탕으로 한, 사전분사 특성을 서로 다른 인젝터 구동방식별로 비교하여 후속 논문에 기술할 것을 미리 밝히고자 한다.

## 2. CRDi시스템내 Pilot Injection 특징

현재 국내에 적용되고 있는 커먼레일 시스템은 Bosch 사와 Delphi사 시스템으로, Fig. 1과 같이 기존의 고압분사 엔진보다 훨씬 높은 초고압으로 압축하는 연료펌프와 1350~1800 bar 정도의 필요압력으로 조절하는 압력 센서 및 압력조절밸브, 그리고 차량의 상태에 적합한 연

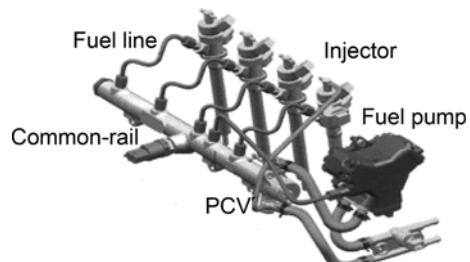
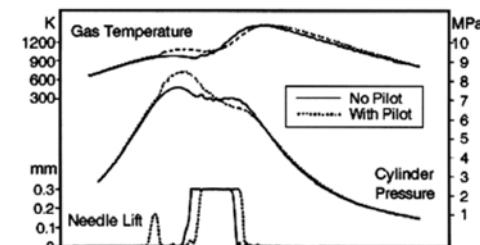
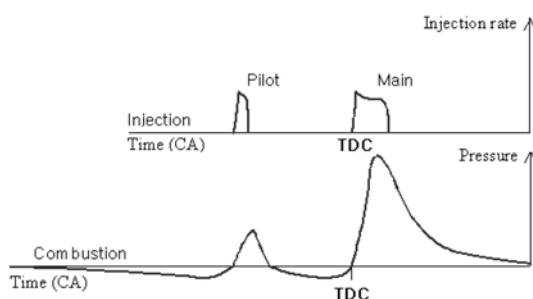


Fig. 1 Common rail injection system which consists of modules



(a) Engine data



(b) Diesel combustion process

Fig. 2 Two-stage fuel injection in CRDi system

료를 분사하는 인젝터와 이들 액츄에이터를 전자 제어하는 ECU 등으로 구성된다.

Figure 2에서 보듯이, 커먼레일 시스템에서 사전분사에 의한 디젤연소장 형성은 이후, 이미 형성된 연소장내에서 전개되는 주분사(main injector)에 지대한 영향을 끼치게 된다. 즉, 효율적으로 연료를 공급함(2단분사)으로써, 연소실내 가연범위로 혼합된 연료-공기(흡입과정 시 유입되는 산화제) 혼합물의 착화지연기간 단축이 가능한 특징이 있다<sup>(7)</sup>.

## 3. 실험장치 및 실험방법

최종적으로 피에조 및 솔레노이드 인젝터를 장착한 커먼레일 연료분사시스템내 고압 사전분사 현상에 관한 실질적인 연구를 위하여, 먼저, 상용 솔레노이드 인젝터를 적용한 실제 커먼레일 연료분사식 디젤엔진의 다단분사 특성을 Fig. 3에 나타낸 2.0 L 디젤엔진 및 제어시스템을 대상으로 한 실제 엔진실험을 통하여 분석하였다.

실험에 사용한 디젤엔진에 대한 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

본 연구에 사용된 커먼레일 분사방식용 고압 인젝터

Table 1. Specification of CRDi Diesel engine

Item	Specification
Type	In-line SOHC 4 valve
Displacement volume	1,991 cc
Max. power	115 ps@4000 rpm
Max. torque	26.5 kg·m@2000 rpm
Bore	83 mm
Stroke	92 mm
Compression ratio	18.4
Compression pressure	30 kg/cm <sup>2</sup> @2700 rpm
Nozzle position	Vertical and center of combustion chamber
Max. fuel pressure	1350 bar
Max. fuel quantity	59.5 mm <sup>3</sup> /stroke@2000 rpm
Fuel injection system	Common rail injection type

Table 2 Specification of electrical characteristics of the solenoid-driven injector

	Unit	Value
Coil resistance	$\Omega$	0.335
Coil inductance	$\mu H$	196
Peak current	A	20
Hold current	A	11
Peak time	$\mu s$	160




분무가시화 실험장치 및 인젝터

는 솔레노이드 코일에 의하여 인젝터 니들 밸브를 개폐하는 방식이며, 일반 가솔린 인젝터와 달리 구동전류가 크다. Fig. 4는 본 연구 대상인 커먼레일 분사시스템용 고압 솔레노이드 인젝터의 구동전류 과형을 나타낸 것이다. 피크-홀드 방식으로 전류를 제어하고 있으며, 이 인젝터의 구체적인 전기 사양은 Table 2에 나타내었다.

엔진 회전수와 부하에 따른 커먼레일내 연료 압력과 분사 기간( $ID_M$ : 주 분사기간,  $ID_p$ : 사전 분사기간)은 Fig. 5에서 보듯이 커먼레일 측면에 부착된 압력제어밸브와 1

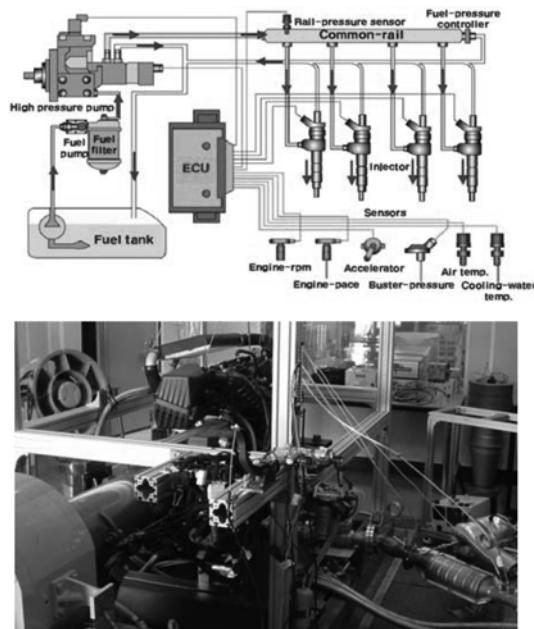


Fig. 3 Experimental setup of common rail direct injection (CRDi) Diesel engine

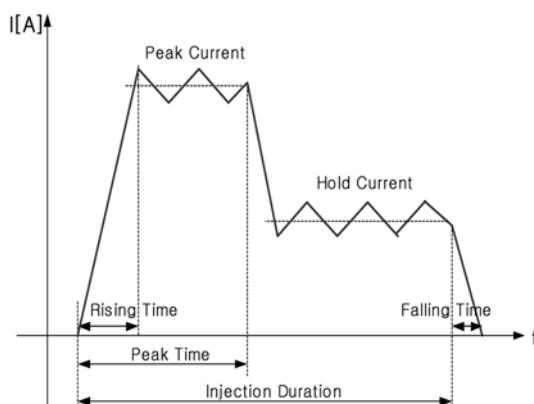
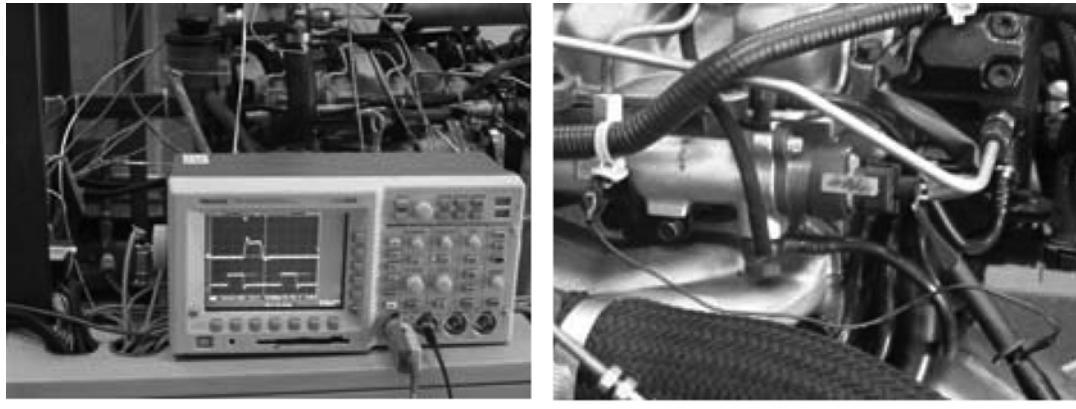


Fig. 4 Driving current wave of solenoid-driven injector for CRDi Diesel engine (a) Measurement of injection signal (b) Probe for CR pressure signal

번 엔진 실린더에 장착된 고압 인젝터 (+)신호 선에 연결된 측정 케이블 및 전류 프로브(Tektronix TCP202)를 주파수 대역폭이 100 MHz인 오실로스코프(Tektronix TDS 3014B)에 연결하여 측정하였다. 그리고 분사된 연료 분사량( $Q_M$ : 주 분사 연료량,  $Q_p$ : 사전분사 연료량)은 Bosch 투브법을 이용한 연료분사율 측정장치를 통해 분사율과 함께 정밀 계측하였다.



(a) Measurement of injection signal

(b) Probe for CR pressure signal

Fig. 5 Measurement of injection duration and pressure in common-rail DI Diesel engine

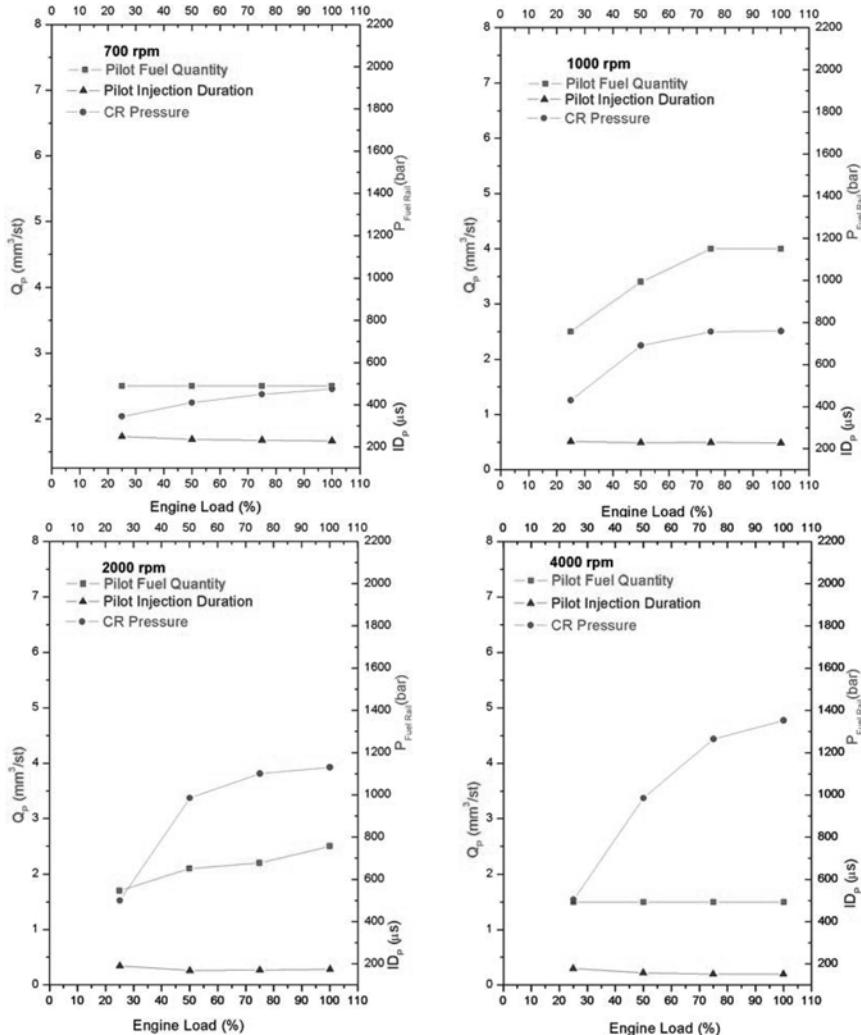


Fig. 6 Characteristics of pilot injection in common rail direct injection Diesel engine

#### 4. 실험결과 및 고찰

Figure 6은 엔진회전수 아이들 운전영역을 포함한 엔진 RPM 및 부하별로 측정한 커먼레일내 연료압력과 분사기간 그리고 사전분사 연료량을 나타낸 것이다. 물론 본 엔진실험에 있어서는 분사시기도 중요하나, 이 분사시기는 고압 분무 실험과는 직접적인 관련이 없기 때문에, 여기서는 별도로 측정하지 않았다. 그러나 2단 분사에 의한 분무 특성 실험 시에는 사전 분사와 주 분사사이의 분사 간격을 본 실험을 통해 구한 실제 데이터를 근거로 하여 설정할 수 있었다. 주 분사특성은 일반적으로 커먼레일 압력과 분사 기간을 서로 반비례적 관계로 설정하여 원하는 연료 분사량을 얻을 수 있는 반면에 사전 분사에 있어서는 분사기간을 엔진 회전수와 부하에 관계없이 거의 일정한 값( $\leq 300 \mu\text{s}$ )으로 유지시킨 채, 커먼레일 압력을 주된 변수로 하여 원하는 소량의 연료 분사량인  $2\sim4 \text{ mm}^3/\text{st}$ 를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 실제 디젤 엔진을 통한 분사 데이터에 대한 분석은 인젝터 성능 비교에 있어서 필수적이며, 특히 본 연구와 같이 인젝터의 구동방식이 서로 다른 경우에 대한 고압 분무 특성 해석 시, 이 특성 조건들은 필히 반영되어져야 할 것으로 판단하였다.

사용된 5홀 기본형 솔레노이드 인젝터를 대상으로, 서로 다른 분사 압력 조건하에서 고속 카메라의 노출시간을  $27 \mu\text{s}$ 로, 허용 영상 취득 시간 간격을  $50 \mu\text{s}$ 로 획득한 분무 영상( $256\times128 \text{ pixel}$ ,  $20,000 \text{ pps}$ )을 Fig. 7에 나타내었다. 짧은 분사기간에도 불구하고 안정적인 분사가 진행되며, 특히 분사개시  $100 \mu\text{s}$  이후부터는 인젝터 노즐내 모든 홀에서 분사되는 분무들이 다공 Sac 노

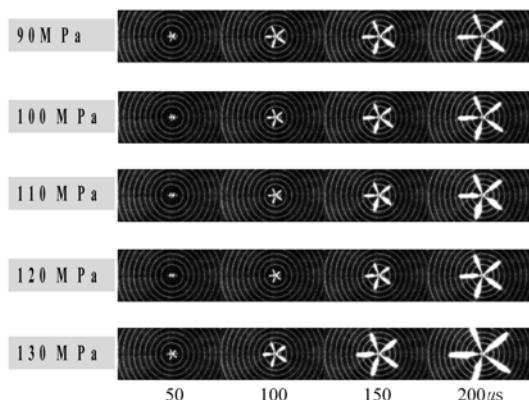


Fig. 7 Spray behavior of solenoid-driven injector with injection duration of  $200 \mu\text{s}$

출에서 분사되는 균일한 대칭성의 분무 형태를 가짐을 알 수 있었다. 또한 분사 압력이 증가함에 따라 분무도 달길이는 비례적으로 증가함을 알 수 있었다.

그리고 커먼레일 연료분사의 장점인 다단 분사의 기본이 되는 2단 분사 현상에 대한 고압 분무 발생 과정을 살펴보고자, 실제 디젤엔진의 분사기간을 적용하여 각 단계별 연속적인 분무 영상을 비교하였다.

Figure 8은 기본형인 5홀(Type I)과 6홀(Type II)을 각각 가지는 2개 솔레노이드 인젝터별로 실제 엔진조건에서 구현되는 사전 분사와 주 분사기간 그리고 두 분사사이의 시간 간격을 그대로 반영하여, 고속 카메라의 노출시간을  $27 \mu\text{s}$ 로, 허용 영상 취득 시간 간격을  $270 \mu\text{s}$ 로 획득한 분무 영상( $512\times512 \text{ pixel}$ ,  $3,600 \text{ pps}$ )이다. 분사 압력은 상대적으로 저압 영역이며, 엔진 운전조건에 따라 다양한 분사기간이 설정되기에, 각 단계별 분무 특징이 서로 다름을 알 수 있었다. Type II의 솔레노이드 인젝터의 경우, 사전 분사 기간보다는 주 분사기간 동안, 분무형성이 잘 이루어짐을 알 수 있다. 그리고 두 인젝터 모두, 사전 분무 영역은 주 분사기간 동안에 발달되는 분무영역의 수 배 이하(예, 사전 분사 기간이 250

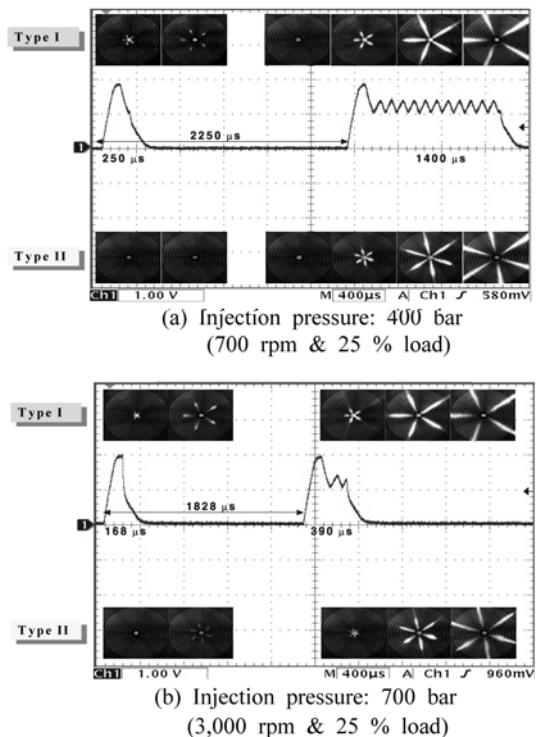


Fig. 8 2-stage spray behavior of two solenoid-driven injectors

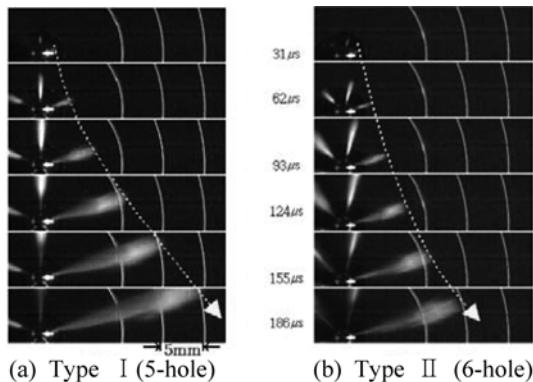


Fig. 9 Initial spray behavior of two solenoid-driven injectors with injection duration of 250  $\mu\text{s}$  and injection pressure of 1000 bar

$\mu\text{s}$  인 경우, 약 5.5 배 분무 도달 길이의 차이 존재)의 작은 영역을 형성함을 알 수 있었다. 또한 각 분사 단계 사이의 시간 간격은 엔진 회전수에 따라 다르며, 연료 분사기간에 비해 약 10 배 정도의 기간을 가짐을 알 수 있었다.

분사 초기에 생성되는 분무 현상을 살펴본 결과인 Fig. 9는 2개 솔레노이드 인젝터별로 분사 압력을 1000 bar 그리고 사전 분사기간에 해당되는 250  $\mu\text{s}$ 를 분사기간으로 설정하여, 고속 카메라의 노출시간을 27  $\mu\text{s}$ 로, 허용 영상 취득 시간 간격을 31  $\mu\text{s}$ 로 획득한 초기 분무 영상(256×64 pixel, 32,000 pps)이다. 초기 분무 발달과정에 있어서 Type I의 솔레노이드 인젝터의 경우, 상대적으로 빠른 분무 선단 속도로 인해 급격한 증가를 보이는데, 이는 Type II의 솔레노이드 인젝터보다 노즐 분공수가 적고, 노즐 분공의 직경이 커서, 상대적으로 뚜렷한 분무 영상 및 분무도달길이가 길게 나타나기 때문이다. 따라서 실험에 적용한 2가지 솔레노이드 인젝터의 구동방식이 동일함을 감안해볼 때, 분사 압력의 영향이 서로 다른 노즐 형상에 있어서 초기 분무 생성에 직접적인 영향을 끼치는 인자임을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

다단분사(multiply injection)가 가능한 커먼레일 시스템에 사용되는 고압 디젤인젝터의 사전분무(pilot spray)

의 특성을 정량적으로 해석하는 것이 본 연구의 최종목표이다. 이의 달성을 위해 먼저, 직접분사식 디젤엔진 실험을 통해 실제 다단 연료분사에 의한 사전분사 특성을 연구한 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 사전분무(pilot spray) 영역은 주 분사기간 동안에 발달되는 분무영역의 수 배 이하(예, 사전 분사 기간이 250  $\mu\text{s}$ 이고, 주 분사 기간이 1,400  $\mu\text{s}$ 인 경우, 약 5.5배 평균 분무 도달 길이의 차이 존재)의 작은 영역을 형성함을 알 수 있었다.

2) 또한 이 두 분사기간 사이의 시간 간격은 이미 분사되는 사전 분사 기간의 약 10배 정도에 해당되는 기간을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 실제적인 분사특성에 대한 이해는 피에조 인젝터를 포함한 새로운 고압 인젝터 구동방식별 디젤분무의 특징을 해석하는데 매우 중요한 정보로서, 향후 고압분무 해석 결과의 타당성을 뒷받침할 필수적인 데이터가 될 수 있음을 밝힌다.

## 참고문헌

- (1) K. Morita, "Automotive Power Source in 21st Century", SAE Review, Vol. 24, 2003, pp. 3~7.
- (2) P. Walzer, "Future Power Plants for Cars", SAE paper No. 2001-01-3192, 2001.
- (3) S. P. Edwards, A. D. Pilley, S. Michon and G. Fournier, "The Optimization of Common Rail FIE Equipped Engines Through the Use of Statistical Experimental Design, Mathematical Modelling and Genetic Algorithms", SAE 970346, 1997.
- (4) C. Fetters, and A. Leipertz, "Potential of a Piezo-Driven Passenger Car Common-Rail System to Meet Future Emission Legislation-An Evaluation by Means of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion", SAE 2000-01-3499, 2001.
- (5) H. Hiroyasu and M. Arai, "Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines", SAE Paper No. 900475, 1990.
- (6) C. Arcoumanis, M. Gavaises and B. French, "Effect of Fuel Injection Processes on the Structure of Diesel Sprays", SAE Paper No. 970799, 1997.
- (7) M. Badami, P. Nuccio and G. Trucco, "Influence of Injection Pressure on the Performance of a DI Diesel Engine with a Common Rail Fuel Injection System", SAE Paper No. 1999-01-0193, 1999.