분사조건에 따른 커먼레일 디젤 인젝터의 분사율 특성에 관한 연구

김형민* · 정재우** · 이기형†

A Study on the Characteristics of Injection-rate at Different Injection Conditions in a Common-rail Diesel Injector

H. M. Kim, J. W. Chung, K. H. Lee

Key Words: Injection-rate (분사율), Injection delay (분사지연), Injection duration(분사기간)

Abstract

Recently, many studies on HSDI diesel engines have been performed to reduce the fuel consumption and CO_2 emission. One of the prominent technique to reduce emission is a high pressure multiple injection. For this technique, the injection rate is a critical parameter in order to determine precise injection duration and timing for combustion control. Thus the purpose of this study was to investigate relationship between the injection rate and the time-signature of chamber pressure at diffeent injection pressure conditions in a common rail direct injection type injector using the Zeuch method. Using the measured correlation constants, estimated fuel injection rates are presented at many different injection conditions.

Nomenclature

ΔP : increase of the pressure (Pa)
K : bulk modulus of the fuel
$\dot{m}$: fuel injection rate (kg/s)
m_{cy} : amount of the fuel per a cycle (kg)
V : volume of the chamber (m^3)
ρ_f : volume of the chamber (m^3)

1. 서 론

최근 자동차용 엔진 개발은 전 세계적인 석유자원의 고갈과 온난화 가스(CO_2)의 배출 규제 협약 등으로 인하여 출력 중심의 설계에서 연비와 배기를 중요시하는 개발로 옮겨지고 있다. 특히, 연비와 CO_2 배출에 장점이 있는 디젤 엔진은 근래에 많은 발전을 하였고, 엄격해지는 배기가스 규제를 만족시키는 저배기화를 목적으로 개발되고 있다. 이를 위한 엔진 개발 기술로는 고압분사기술, 가변터보차져, 배기가스재순환, 후처리 그리고 예혼합 압축착화 연소[1] 등이 있다. 그 중에 고압 분사기술은 다단분사[2]를 기본으로 정밀한 분사 제어를 통하여 연소실내에 연료와 공기의 혼합을 활성화하여 배출가스를 줄이려는 목적에서 연구되고 있다. 이러한 분사 방식은 주 분사 이전에 약간의 연료를 분사함으로서 디젤 노크와 과다한 NOx의 생성을 방지하고, 주 분사이후 분사는 촉매의 활성화를 목적으로 한다. 또한 고압분사에 의해 연료와 공기의 혼합을 향상시켜 스모크도 줄일 수 있다. 현재 승용 디젤 엔진에서는 5회 이상 분사되고 있는 만큼, 실제 분사시기와 분사기간의 정확한 계측이 요구[3]되고 있다. 현재 분사율 특성을 분석하기 위한 계측기는 2~3개의 국외 업체의 장비가 사용되

(2007년 9월 10일 접수 ~ 2007년 9월 27일 심사완료)
*회원, 한양대학교 일반 대학원
**회원, 자동차 부품 연구원
†책임저자, 회원, 한양대학교
E-mail : hylee@hanyang.ac.kr
TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550

고 있으나 측정 장비 가격이 비싸고, 측정방법이 복잡하여 측정이 원활히 수행되기가 어려운 실정[4]이다.

따라서 본 연구에서는 자체 제작한 분사율 측정장치[5]를 이용하여 커먼레일 디젤 인젝터의 분사압력 및 분사기간에 따른 분사율을 측정하였고, 분사 지연시간 및 실제 분사기간 등을 수식화 하여 실제 엔진조건에서 사용할 수 있도록 하였으며, 분무 가시화 장치를 통하여 검증하였다.

2. 실험 장치 및 연구 방법

2.1. 분사율 측정 원리

분사율 측정방법은 일반적으로 W-Bosch 법[6](장관법), Zeuch법[7]이 가장 많이 사용되고 있다. 장관법은 장관내에 전파되는 연료의 압력파를 이용하여 분사율을 측정하는 방법으로 반사판을 감쇠시켜야 하는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 Zeuch법을 사용하여 분사율을 측정[5]하였다. 이러한 Zeuch법의 측정 원리는 연료를 가득 채운 후 일정압력을 유지한 상태에서 밀폐 용기 안에 연료를 분사하면, 연료의 분사량에 비례하여 용기 내의 압력이 상승하는 원리를 이용하여 분사율을 측정하는 방법이다.

이의 기본 원리를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 즉, 체적 V의 용기 안에 연료가 ΔV만큼 분사되었을 때, 연료의 압력 상승과 체적 탄성계수의 상호관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 연료 질량 분사율을 dm/dt라 하면, 연료 분사율은 다음의 식 (2)와 같다.

$$\Delta p = K \times \frac{\Delta V}{V} \tag{1}$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho_f \times \frac{V}{K} \times \frac{dp}{dt} \tag{2}$$

식 (2)를 사용하여 분사율을 측정하기 위해서는 연료의 체적탄성계수 K를 알아야 한다. 연료의 체적탄성계수는 온도와 압력의 영향을 받게 되고, 본 실험에서 사용한 연료는 혼합물인 디젤이므로 정확한 체적탄성계수를 문헌으로 구하는 것은 매우 힘들다. 그러므로, Zeuch법을 이용하는 상용 분사율 장치에 있어서는 임의 배압 및 온도에서의 체적 탄성계수를 계측하기 위한 검증장치가 별도로 부가되어 있는 것이 일반적이다. 이와 같은 검증장치는 작은 피스톤의 왕복운동으로부터 압력용기 내에 투입되는 체적과 압력의 상승을 통하여 체적 탄성계수를 역으로 계산하도록 되어있다. 그러나, 이와 같은 장치는 검증용 피스톤의 왕복운동 시의 용기의 기밀성 유지 및 구동장치의 부가 등 측정 시스템의 구조가 매우 복잡한 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 몇 가지의 가정 하에 이상과 같은 검증 작업을 생략할 수 있는 실험방법을 구축하여 사용하였다. 본 실험에서 사용한 분사율 계산 공식을 다시 쓰면 식 (3)과 같다.

$$\frac{dm}{dt} = \rho_f \times \frac{V}{K} \times \frac{dp}{dt} \approx const. \times \frac{dp}{dt} \tag{3}$$

분사율 실험시 한 사이클당 분사된 연료량을 측정하여 분사기간 동안의 식(3)을 적분하면 매 사이클당 분사된 연료량을 구할 수 있다. 이로부터 분사기간 동안 연료의 체적 탄성계수를 상수라 가정하면, 이의 관계를 다음의 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$m_{cy} \approx const. \int_{ie}^{is} \left(\frac{dp}{dt}\right) dt \tag{4}$$

따라서 위의 식으로부터 상수로 표현되는 연료 밀도

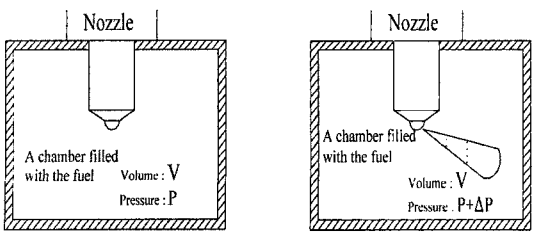

Fig. 1 Principle of Zeuch method

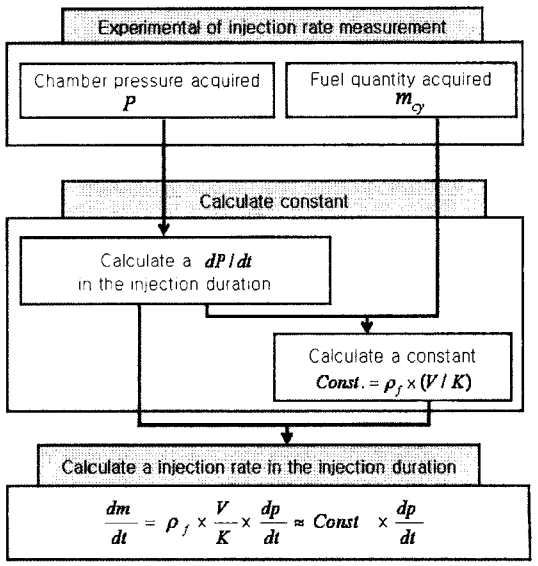

Fig. 2 Flow chart of a injection rate measurement procedure

와 체적 탄성의 곱을 계산하여 구할 수 있다.

$$const. = \frac{m_{cy}}{\int_{ie}^{is}\left(\frac{dp}{dt}\right)dt} \quad (5)$$

이와 같이 얻어진 상수를 이용하여 아래의 식(6)을 이용하여 연료의 순간 분사율을 계산하였다.

$$\dot{m} = const. \times \frac{dp}{dt} \quad (6)$$

Figure 2는 Zeuch법을 사용하여 분사율을 측정하는 과정의 흐름도를 나타내었다.

2.2. 분사율 실험 장치 및 조건

본 연구에서 사용한 분사율 측정 장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 실험 장치는 크게 5 부분으로 구성되어 있다. 각 구성품은 연료공급 시스템, 분사신호 발생기, 배출신호 발생기, 데이터 취득 및 제어 시스템, 압력 용기 등으로 분류될 수 있다. 연료공급 시스템은 연료펌프, 커먼레일, 인젝터로 구성되며, 분사신호 발생기는 펄스 발생기, 인젝터 드라이버, 파워 서플라이로 구성된다. 매 사이클 마다 압력용기 내부의 압력을 초기상태로 일정하게 유지시키기 위하여 GDI 인젝터를 사용하여 압력용기 하단부에서 연료를 배출하였다. 그리고, 용기내부의 압력은 압력용기에 Kistler사의 절대압력센서를 사용하여 측정하였고, PC에 장착된 Counter board 및 A/D board를 사용하여 데이터 취득 및 각각의 구성부품을 제어하였다. 본 실험

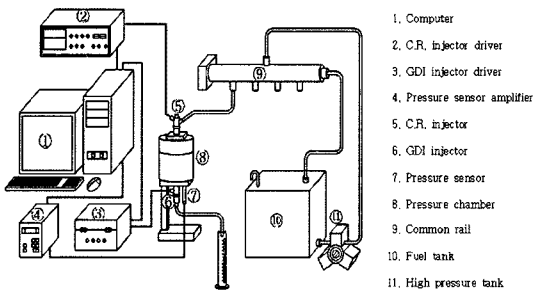

Fig. 3 Diagram of injection rate measurement apparatus

Table 1. Experimental condition

Pump speed	700 RPM
Injection pressure	40~100 MPa
Ambient pressure	1~4 MPa
Injection duration	0.4~1 msec
Number of tests	1000

에 사용한 인젝터는 D 사의 6공 인젝터이다.

본 연구의 실험 조건은 Table 1에 나타낸 것과 같이 고압펌프의 회전수는 엔진 회전수 1400 RPM을 기준으로 하여 700 RPM으로 선정하였다. 또한, 분사압력에 대한 분사율 특성을 측정하기 위하여 100 MPa까지 분사하였고, 분사시기에 대한 영향도 평가를 위하여 분위기 압력을 4 MPa까지 제어하였으며, 1000회 분사하여 평균값을 취득하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 분사량 측정 결과

Figure 4는 분사압력 및 분사기간에 따른 분사량 특성을 나타낸 그림이다. 분사압력이 증가하고 분사기간이 증가할수록 분사량은 증가한다. 또한, 분사량 측정 결과

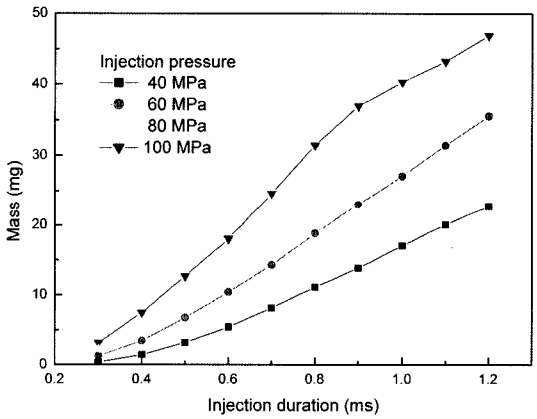

Fig. 4 Injection mass according to injection pressure and duration

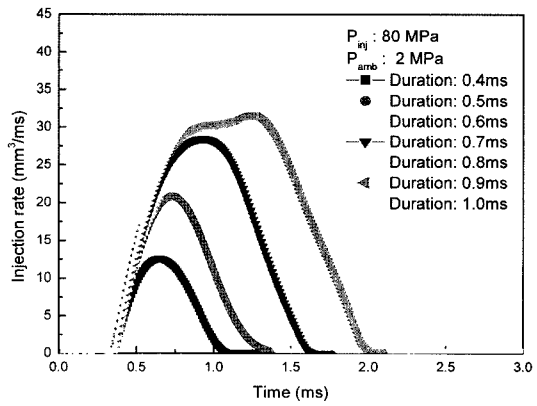

Fig. 5 Injection rate according to injection duration

는 식(4), (5)에 의하여 분사율 상수 계산에 사용되었다.

3.2. 분사기간 및 압력에 따른 분사율 특성

Figure 5는 분사압력이 80 MPa, 분위기 압력이 2 MPa 일 때의 분사기간에 따른 분사율 특성을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 분사 초기 지연 기간은 0.35 msec 정도로 동일하고, 분사율 상승 및 하강 기울기는 같음을 알 수 있다. 또한 분사기간이 증가 할수록 분사율 높이가 상승하고 후기 지연기간이 길어지며 0.8 msec 이상에서는 최대값이 일정해 지는 구간이 존재한다. 이는 분사기간이 증가함에 따라 실제 연료가 분사되는 시간과 분사량의 증가되고 인젝터의 니들이 완전히 개방되어 분사압력이 균일하기 때문으로 사료된다.

Figure 6은 분사기간이 0.8 msec, 분위기 압력이 2 MPa일 때, 분사압력에 따른 분사율 특성을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 분사 초기지연기간은 분사압력이 증가함에 따라 감소함을 보이고 있고, 후기지연기

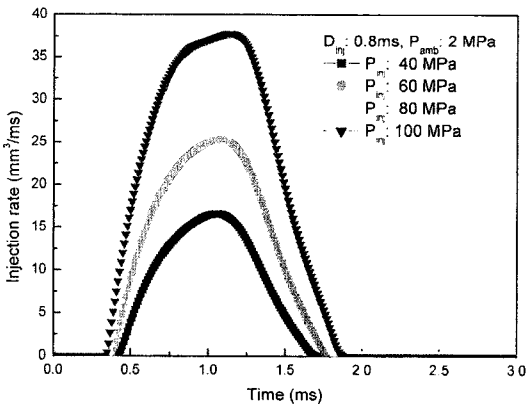

Fig. 6 Injection rate according to injection pressure

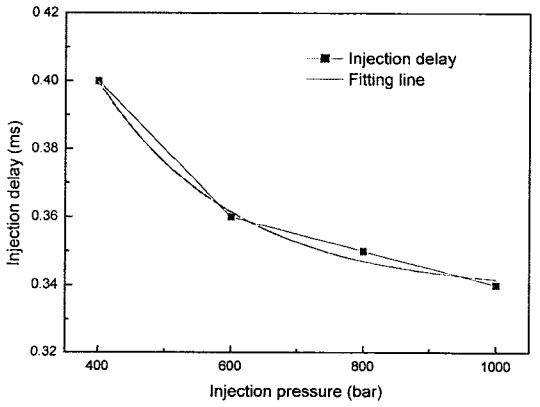

Fig. 7 Injection delay according to injection pressure

간은 분사압력이 증가함에 따라 증가됨을 보이고 있다.

Figure 7은 분사압력에 따른 분사의 초기 지연기간을 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 설명한 것과 같이 분사압력이 증가하면 초기 분사지연기간이 감소한다. 이는 분사압력 증가로 인한 초기 분무의 운동량 증가하기 때문으로 사료되며, 식 (7)에 정량적으로 나타내었다. 식 (7)을 이용하여 분사압력과 분사신호에 따른 실제 분사시기를 산출할 수 있다.

$$y = 0.338 + 0.433 \times (e^{-x/20.463}) \quad (7)$$

y: Injection delay, x: Injection pressure

Figure 8은 분사압력에 따른 실제 분사기간을 나타낸 그림이다. 분사압력이 증가할수록 실제 분사되는 기간이 증가됨을 보이고 있다. 이는 분사압력이 증가되면, 인젝터 내부의 압력 증가로 인해 니들의 닫히는 시기가 지연됨으로써 나타난 결과로 사료된다. 또한, 식 (8)에 분사압력에 따른 실제 분사기간을 정량화하였다. 분사압력이 증가되면 오차가 증가하는데, 이는 분사압력이 증가함에 따라 챔버내의 압력파의 증가에 의해 분사의 시작과 끝나는 시점을 판별하기가 어렵기 때문에 나타난 결과로 생각되나 오차 범위 내이므로 식 (8)을 이용하여 분사압력과 분사기간 신호를 알면, 실제 분사기간을 산출할 수 있다.

$$y = (1.505 + 0.0045 * P_{inj.}) * x \quad (8)$$

y: Real injection delay, x: Signal injection duration

3.3. 분위기 압력에 따른 분사율 특성

Figure 9는 분위기 압력에 따른 분사율 특성을 나타낸

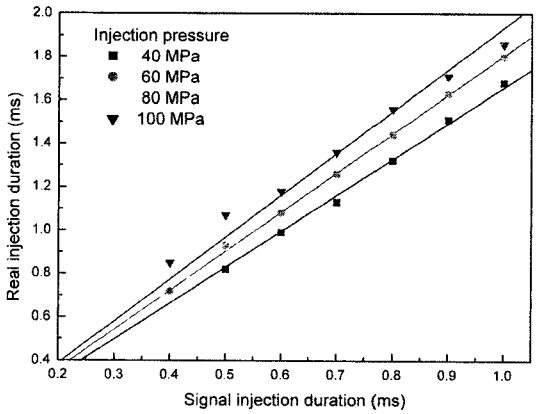

Fig. 8 Real injection duration according to injection pressure

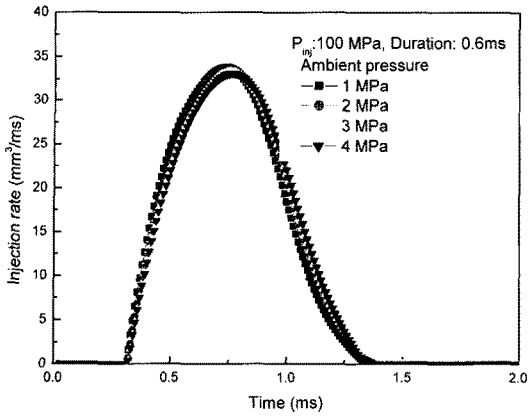

Fig. 9 Injection rate according to ambient pressure

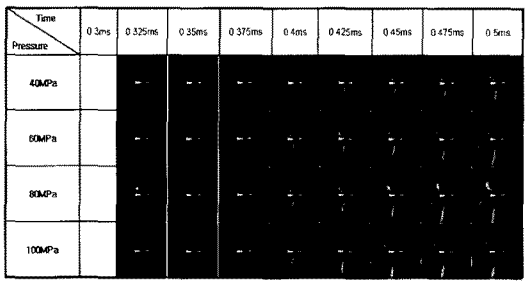

Fig. 10 Spray visualization for verification of injection delay

그림이다. 분위기 압력은 연소실 압력을 모사한 것으로서 분사시기가 TDC에 가까울수록 연소실 압력은 증가한다. 그림에서 보는 바와 같이 분위기 압력에 따른 분사 초기지연기간과 후기지연기간은 차이가 없음을 볼 수 있다. 따라서 분사시기에 따른 분사지연기간은 차이가 없는 것으로 사료된다. 그러나 분위기 압력이 증가함에 따라 분사율 상승 기울기가 감소된다. 이는 분위기 압력이 증가함에 따라 분사된 연료의 운동량이 감소되어 나타난 결과로 사료된다.

3.4. 분사지연 기간 검증

Figure 10은 분사 초기지연기간을 검증하기 위하여 고속카메라를 이용하여 인젝터 팁 근처를 확대하여 촬영하였다. 이때 고속카메라의 촬영속도는 초당 40,000 프레임이고, 한 장당 시간은 0.025msec이다. 그림에서 보는 바와 같이 분사율에서 측정된 초기 지연기간이 일치하는 것을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 분사율 측정 시스템을 이용하여 분사압력, 분사기간 및 분위기 압력에 따른 분사율을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분사압력이 80 MPa일 때, 분사기간에 따른 초기 분사지연기간은 0.35 msec 정도로 동일하고, 분사율 곡선의 상승 및 하강 기울기는 같음을 알 수 있다. 또한 분사기간이 증가 할수록 분사율이 상승하고 후기 지연기간이 길어진다.

2) 분사압력에 따른 초기 분사지연기간은 분사압력이 증가할수록 감소되며, 후기 분사지연기간은 증가함을 알 수 있다.

3) 분위기 압력에 따른 분사 초기지연기간과 후기지연기간은 차이가 없으나, 분위기 압력이 증가함에 따라 분사율 상승 기울기가 감소된다.

4) 분사율 실험장치에 의해 계산된 분사 초기지연기간은 고속카메라로 촬영된 값과 유사함을 보였다.

후 기

본 연구는 자동차부품연구원에서 주관하는 자동차 기반기술 사업과 2007년 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었고 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

(1) F. Zhao, T. W. Asums, D. N. Assanis, J. E. Dec, J. A. Eng. P. M. Najt, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines: Key Research and Development Issues", PT-94, 2003.

(2) P. J. Shayler, T. D. Brooks, G. J. Pugh, R. Gambrill, "The Influence of Pilot and Split-Main Injection Parameters on Diesel Emissions and Fuel Consumption" SAE 2005-01-0375, 2005.

(3) N. Hikosaka, "A View of the Future of Automotive Diesel Engines", SAE.972682, 1997.

(4) Y. Ohmori, T. Ikeda, A. Takamura, Y. Sato, L. Jun, T. Kamimoto, "Measurement of the Rate of Multiple Fuel Injection With Diesel Fuel and DME", SAE 2001-01-

0527, 2001.

(5) K. H. Lee, J. W Chung, C. S. Lee, "A Study on the Measurement Technique for Injection Rate and the Effects of the Nozzle Hole Number on Injection Characteristics", Transactions of KSAE Vol. 10, No. 3, 2002.

(6) W. Bosch, "The fuel rate indicator: A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection", SAE 660749, 1966.

(7) A. Takamura, T. Ohta, S. Fukushima, T. Kamimoto, "A study on precise measurement of diesel fuel injection rate", SAE 920630, 1996.