

소형 HSDI 디젤엔진에서의 Common Rail을 이용한 분사압력 변화가 Smoke 및 연료소모량에 미치는 영향

The Effect of Injection Pressure Variations on the Smoke and Fuel Consumption in a Small HSDI Diesel Engine with Common Rail Injection System

류명석*, 신범식*
Myungseok Lyu, Bumsik Shin

ABSTRACT

Great attentions are paid to HSDI diesel engine for passenger cars because of its high thermal efficiency. The most interesting research in HSDI diesel engine developments is focused on applying common rail system as a fuel injection equipment. In this study, a series of tests are carried out to investigate the effect of injection pressure variations on the smoke and fuel consumption in a small HSDI diesel engine with common rail system. As a result of this study it is concluded that there is an optimum rail pressure dependent on combustion system such as nozzle type, combustion chamber geometry.

주요기술용어 : HSDI diesel engine(고속 직분식 디젤엔진), Injection pressure(분사압력), Common rail, Thermal efficiency(열효율), Fuel consumption(연료소모량)

Nomenclature

- | | |
|--|-------------------------------|
| $x_{t\omega}$: penetration with swirl | C_d : discharge coefficient |
| x_t : penetration without swirl | Q : flow rate |
| v : fuel jet velocity | A : flow area |
| h : nozzle hole diameter | P_{rail} : rail pressure |
| Δp : pressure difference or MEIP | |
| t_{ign} : ignition delay | |
| γ_f : relative density of fuel during injection | |
| ρ_c : density of air during injection | |
| ω_b : angular velocity of bowl contents | |

1. 서론

직접분사식 디젤 엔진은 간접 분사식 디젤엔진에 비해 열효율은 높으나 회전수가 낮아 주로 트럭 및 버스용의 엔진으로만 이용되어 왔다. 최근 고압 연료분사장치 개발, 유동 및 연료혼합 기술

*회원, 현대자동차 디젤엔진시험팀

의 발전으로 직접분사식 디젤 엔진의 회전수를 높이는 것이 가능하게 되어 이를 승용차용 엔진으로 적용하기 위한 고속 직분식 디젤엔진의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 승용차용 소형 직분사 디젤엔진의 상용화는 유럽이 주도하고 있으며, Audi는 1997년 6월에 V6 2.5L TDI 직분식 디젤엔진(4valve,150hp)를 탑재한 차량을 발표하였다. VW은 1.4L TDI 디젤 3기통 엔진을 탑재하였다. 또한 Renault는 1.9L 직분식 디젤엔진을 2002년경 전차중에 직분식 디젤엔진을 적용할 계획이며, 현대자동차에서도 Common rail을 사용한 직분식 디젤엔진(1.2L-2.5L)을 양산개발 예정이다.¹⁾ 이에 본 연구에서는 엔진개발시 데이터베이스로 활용하기 위하여, 새로운 연료분사시스템인 Common Rail을 사용한 분사 압력변경이 소형 HSDI 디젤엔진의 Smoke 및 연료소모량에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 시험 및 분석

2.1 Common Rail 및 시험엔진

본 연구에 사용된 Common Rail은 최대 Rail 압력이 1350 Bar인 시스템으로 Rail압력, 분사시기제어, Multiple Injection이 가능하다. 시험엔진의 사양은 Table1과 같다. 시험 장치는 Fig.1에 나타난 본 바와 같이 다기통 엔진의 Turbo

Table 1 Specification of test engine

Engine Type	DI Diesel Single Cylinder Engine
Bore × Stroke	75.5 × 83.5
Breathing System	4 Valve TCI
Valve Train	DOHC
FIE	Common Rail
Test Nozzle (Flow Rate)	0.143 × 5 (305cc/30s), 0.125 × 5 (245cc/30s), 0.135 × 5 (245cc/30s), 0.132 × 5 (265cc/30s)

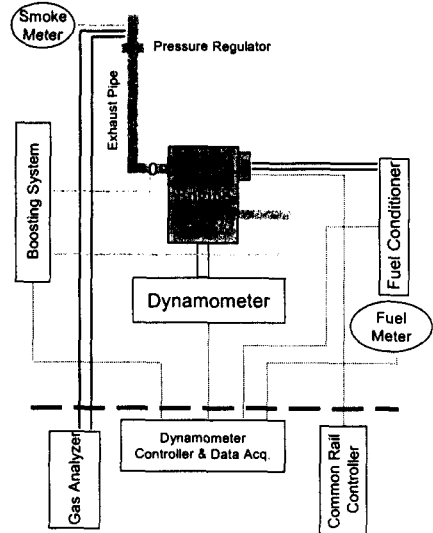


Fig.1 Schematic diagram of test equipment

Charger와 Inter Cooler를 모사하기 위해 Boosting System을 설치하였다. Boosting System은 흡입공기 온도와 압력을 제어하는 기능과 함께 배기가스압력을 제어하는 기능이 있어 다기통 엔진에서 엔진 흡배기 조건을 단기통 엔진에서 상사시킨다. 실제 Turbo Charger는 단기통 엔진에서 배기가스 배출 사이클이 길어 엔진 장착에 문제가 있다.

2.2 Rail압력변화가 Smoke에 미치는 영향

Common Rail의 특징 중 하나는 분사압력을 Rail 압력제어를 통하여 변경할 수 있는 것이다. 분사압력 증가가 Smoke에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Rail압력을 증가시켜가며 시험한 결과로 Fig.1은 Rail압력 변화에 따른 Smoke의 변화를 Fig.2는 Rail압력 1100 Bar에서의 시험후 연소실 사진을 보여준다. 시험 분사시기는 동일하게 제어하며 Rail 압력을 변경시키며 연료량을

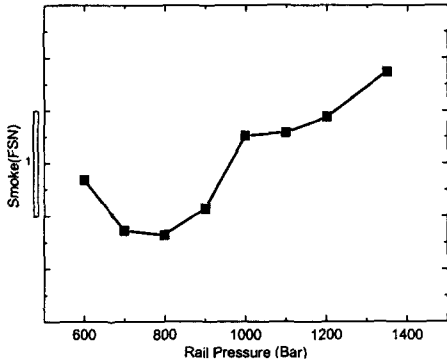


Fig. 2 Smoke dependence on rail pressure (4000 rpm, BMEP : 8.5 Bar)

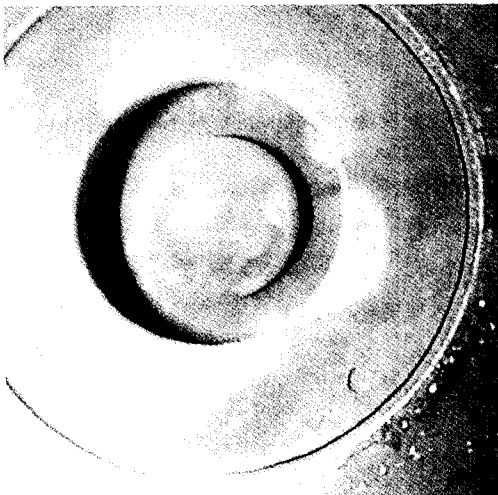


Fig. 3 Soot mark

조절하여 BMEP가 일정하게 유지되도록 하였다. Smoke는 Fig.1에서 Rail압력이 증가함에 따라 감소하다가 일정 압력을 지나면서 Smoke가 다시 증가함을 볼 수있다. Rail 압력을 1100 Bar로 유지한 조건에서 시험한 후의 연소실은 Fig.3와 같은 모양을 가지고 있었다. 5 Hole Nozzle에서 나온 연료 Spray에 의한 자취를 볼 수 있다. 이 자취는 연소실의 입구와 Squish Zone에 걸쳐 있

다. 이 자취는 분사된 연료 Spray가 기화되기 전에 연소실 면에 부딪쳐 생기는 것으로 보인다. 분사된 연료가 기화 전에 온도가 낮은 면에 부딪치면 Smoke나 HC가 증가한다. 연소가 이루어지지 않은 연료는 주위 온도에 따라 Soot 혹은 HC가 된다. Soot는 주위 온도가 1000K~2000K에서 생성되는 것으로 알려져 있다.²⁾ Smoke는 연료 공기의 혼합이 원활치 않아 국부적으로 Rich한 영역에서 연소가 되지 않은 연료가 Soot로 생성되어 발생하거나 분사된 연료가 기화되기 전에 온도가 낮은 연소실 면에 부딪쳐서 Squish Zone에 들어가 산화되거나 인접 Spray간의 중첩에 의해 나타난다. Fig.2을 볼 때 Rail압력을 증가시키면서 나타나는 Smoke의 증가는 분사된 연료가 연소실에 Wetting 되었거나 혹은 Squish Zone에 들어가서 나타나는 것으로 보인다.

Fig.4은 피스톤이 상사점을 지나 하사점으로 갈 때의 유동을 나타낸 것으로 이 시점이 중요한 것은 연료 분사가 이루어지면서 피스톤안의 연소실이 연료분사 Nozzle에 멀어지고 연소실에서 Squish Zone으로의 유동이 생겨 분사된 연료가 Squish Zone 들어갈 수 있다. Rail 압력이 증가함에 따라 연소실 벽면에 부딪칠 가능성을 확인하기 위하여 Swirl를 고려한 Penetration을 아래식 (1)로 계산하였다. 식(1)은 가시화 결과를 바탕으로 하여 이루어졌다.³⁾

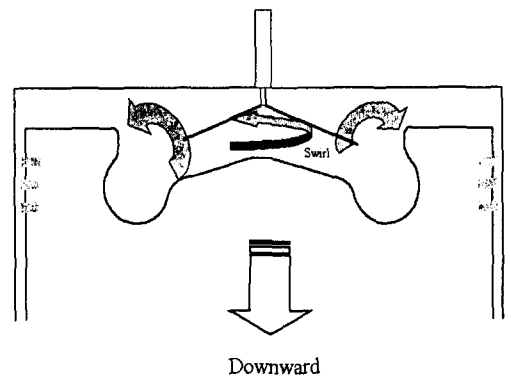


Fig. 4 Flow pattern with piston motion

$$\frac{x_t - x_{t\omega}}{x_t} = 0.35 \left[\frac{x_{tw}}{h} \frac{\rho_c}{1000 \gamma_f} \left(\frac{\omega_b x_{t\omega}}{1000 v} \right)^2 \right]^{0.44} \quad (1)$$

여기서

$$x_t = 70.145 \left(\frac{h \rho_c}{1.227} \right)^{0.5} \left(\frac{\gamma_f}{0.84} \right)^{0.4} (\Delta p)^{0.25} \left(1 + \frac{\rho_c}{1.227} \right)^{-0.85} t_{ign}^{0.6} \quad (2)$$

$$v = C_d \sqrt{\frac{200 \Delta p}{\gamma_f}} \quad (3)$$

식(1)를 이용하여 착화가 일어나기 전까지 Penetration를 계산한 결과 Fig.5와 같이 나타났다. 착화시간인 t_{ign} 은 연소실 압력을 측정하여 Heat Release Rate가 연료기화가 인해 음수로 내려갔다가 양수가 되는 시점으로 하였다.⁴⁾ Fig.5에서 분사압력이 증가함에 따라 Penetration의 증가가 나타나 분사된 연료가 연소실 바깥면에 접근하는 것을 볼 수 있다. Rail 압력이 960 Bar가 넘으면 연소실 면에 부딪칠 수 있음을 알 수 있다. Fig.2을 보면 Rail압력이 800 Bar 보다 커지면 Smoke가 증가하는 것을 볼 수 있어 Fig.5 계산의 Wetting 예측결과와 일치함을 알 수 있다. 분사기간의 평균 분사압력인 ΔP 가 Rail압력과 차이가 나는 것은 Rail에서 압력이 미세한 유로가 있는 인젝터를 거치면서 압력강하가 일어나기 때문이다. 특별히 Common Rail에서는 초기 분사율이 높을 경우 NOx 및 연소소음에 증가를 초래하고 인젝터의 Needle를 안정적으로 제어하기가 어려워 적정 수준으로 초기 분사율을 조절할 필요가 있다.⁵⁾ Fig.6를 보면 Needle Lift가 VE 전자식 펌프에 비해 초기에 Needle 올라가는 속도가 낮고 후반부

에도 낮음을 볼 수 있다. 이러한 설계로 분사기간동안의 Nozzle 입구 평균 분사압력이 Rail압력보다 낮게 된다. ΔP 계산은 Orifice Model인 식(4)를 이용하여 구하였다.

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (4)$$

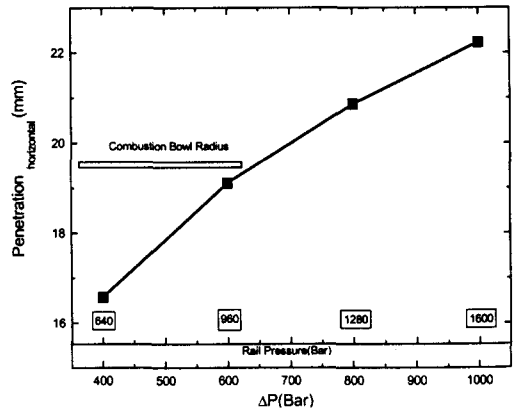


Fig. 5 Penetration dependence on rail pressure (4000 rpm, BMEP 8.5 Bar)

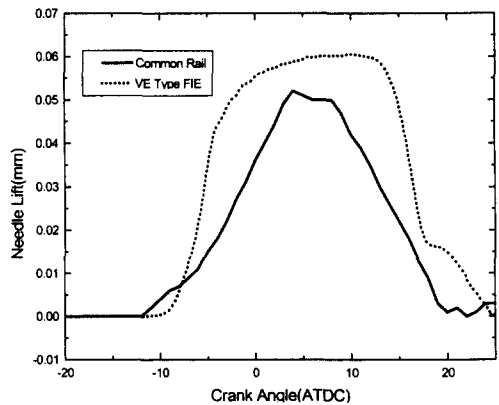


Fig. 6 Measured needle lift in common rail and VE pump at 4000 rpm

분사된 연료가 Squish Zone에 유입되어 산화되었을 가능성에 대해 알아보기 위하여 초기에 노즐에서 분사된 연료 Spray의 방향이 상하방향으로는 유지된다는 가정 하에 식(1)을 이용하여 피스톤의 움직임에 따른 연소실과 Spray간의 위치를 계산한 결과 Fig.7과 같이 나타났다. Fig.4과 같이 피스톤이 하사점으로 가면서 연소실에서 Squish Zone으로의 유동이 나타나 연료 Spray가 연소실을 벗어날 수 있어 상사점 이후의 분사에 유의하여 계산을 수행하였다. 분사된 연료가 분사된 후 착화되기 전인 크랭크 각으로 10°가 지나면 연소실 면에 근접함을 볼 수 있다. 피스톤이 22ATDC 위치가 되면 분사된 연료가 연소실 입구부에 위치하게 되어 Squish Zone으로의 유입이 가능함을 확인할 수 있다. Fig.6의 Needle Lift 움직임에서 볼 때 10 ATDC이후에 분사된 연료가 Squish Zone으로 유입되었을 가능성이 높다. Rail압력이 높으면 Fig.5와 같이 Penetration이 길어져 이러한 현상은 가속될 것을 예상할 수 있다. 위의 결과에 의하면 Fig.2에서 800 Bar 이상의 Rail압력 증가에 따라 Smoke가 증가한 것은 분사된 연료가 기화되어 착화가 일어나기 전에 연소실 면에 연료 액적이 붙는 wetting과 후반부에 분사된 연료가 Squish Zone으로 유입되어 나타난 것을 알 수 있다.

Fig.7에서와 같이 분사된 연료가 Squish Zone으로의 유입되는 것을 막기 위해 Fig.6에서 분사 후반부에 분사되는 연료량을 줄이거나 Penetration이 작아지도록 해야 한다. 후반부에 분사되는 연료량을 줄이는 방법으로 분사시기를 전각시키는 방법이 있으나 이 방법은 연소실 압력을 급격히 증가시켜 내구성 및 소음을 악화시킬 수 있어 한계가 있다.

노즐의 유압유량을 변경하여 연소실 압력을 측정한 결과 Fig.8과 같이 나타났다. 고속인 4000rpm에서 유압유량을 높이면 후반부에 분사되는 연료량을 줄일 수 있음을 Needle Lift로 확인할 수 있다. 노즐 유압유량이 245 cc/30s에서 연소가 265cc/30s에 비해 길게 이어지는 것을

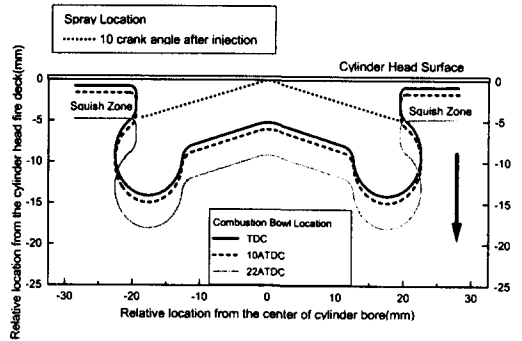


Fig. 7 Relative location between combustion bowl and spray when fuel is injected before 10 crank angle (4000rpm, Rail Pressure : 960 Bar)

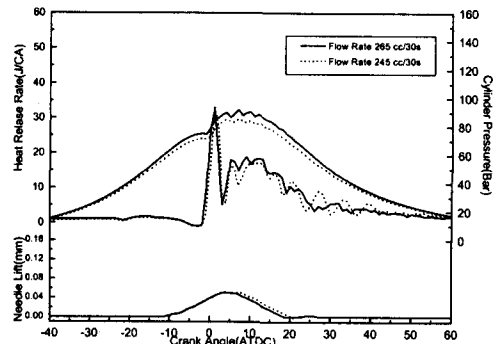


Fig. 8 Cylinder pressure and heat release rate with the change of nozzle flow rate (4000 rpm, IMEP : 9 Bar, Prail : 1100Bar)

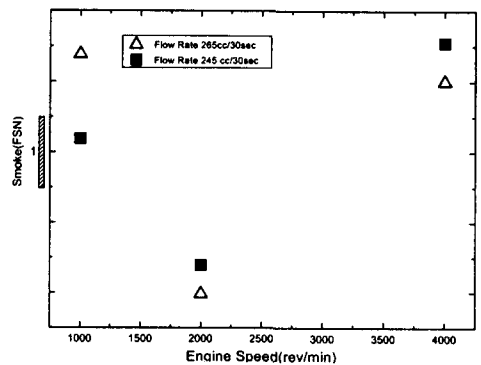


Fig. 9 Smoke dependence on flow rate at full load

Heat Release Rate를 통해 볼 수 있다. 이러한 연소특성의 차이로 Fig.9과 같은 Smoke의 차이가 나타났다. 이는 피스톤이 하강하면서 연소가 길게 이어지며 연소되지 않은 연료의 HC가 산화되어 저속영역(1000-1500rpm)을 제외한 부분에서는 Smoke가 증가된 것으로 판단된다. 이에 반해 저속(1000rpm)에서 Smoke가 감소된 것은 공기 유동이 충분하지 않은 조건에서 유압유량을 크게 하기 위하여 Nozzle Hole Diameter이 증가하여 연료의 미립화가 상대적으로 원활히 이루어지지 않은 것으로 보인다. Penetration를 줄이는 방법으로는 Swirl를 높이는 것과 Nozzle Hole Diameter를 줄이는 방법으로 가능하다. 그러나 Nozzle Hole Diameter를 줄이면 Fig.8, 9에서 같이 고속에서 분사기간이 길어져 Smoke를 오히려 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 유압유량은 동일하게 하기 위하여 C_d 를 증가시키고 Nozzle Hole Diameter를 줄인 노즐을 적용하여 보았다. C_d 를 증가시키고 Hole Diameter를 줄인 Nozzle이 전 운전 영역에서 Smoke가 감소함을 Fig.10과 같이 확인할 수 있었다.

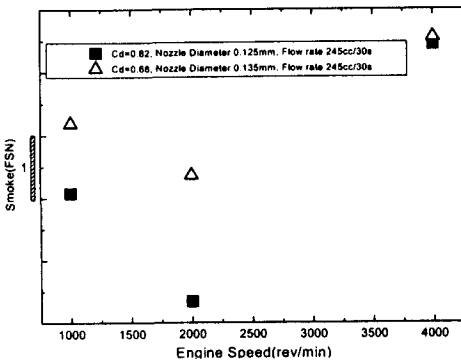


Fig. 10 Smoke dependence on nozzle hole C_d at full load

2.3 Rail압력 변화가 연료소모량에 미치는 영향

Rail압력 증가에 따른 BSFC는 Fig.11과 같이 나타났다. BSFC는 분사압력이 700 Bar 이상에서는 Rail압력이 증가함에 따라 BSFC가 증가함을 볼 수 있다. ISFC의 감소로 보아 연소효율이 감소하여 BSFC가 악화되는 것으로 판단하기 어렵다. Fig.12는 Rail압력 증가에 따른 구동 토크 증가를 보여 주는 것으로 Rail압력 증가에 의해 BSFC가 악화되는 원인을 찾을 수 있다.

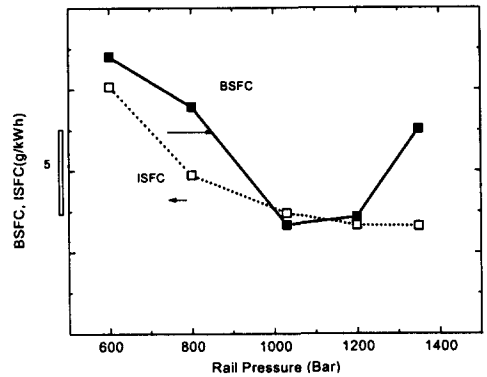


Fig. 11 ISFC, BSFC with rail pressure (2000 rpm IMEP : 14 Bar)

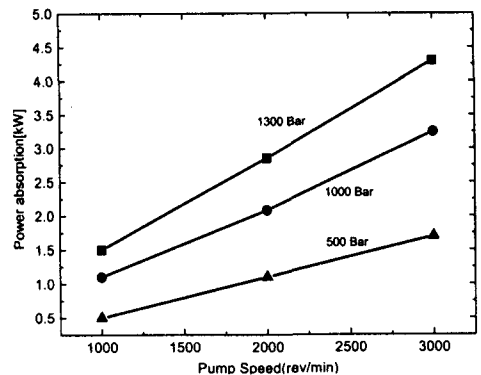


Fig. 12 Power consumption at high pressure pump of a common rail⁶⁾

3. 결 론

Common Rail를 이용하여 분사압력 변경이 소형 HSDI 디젤엔진의 연료소모량과 Smoke에 미치는 영향을 파악하기 위하여 엔진 시험 및 분석을 하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 소형 HSDI 디젤엔진의 Smoke는 분사압력이 증가하여도 연료 Spray에 의한 Wetting으로 증가할 수 있다.

2) 동일 Rail압력에서 유압유량을 증가시키면 고속에서는 Smoke가 감소하고 저속에서는 증가하였으며 Nozzle의 C_d 를 증가시키면 동일 유압유량에서 작은 직경의 Nozzle를 적용할 수 있어 Smoke를 저감시킬 수 있다.

3) 연료소모량은 분사압력의 증가로 인한 연소 개선으로 향상될 수 있으나 과도한 분사압력 증가는 펌프구동력 증가로 인해 악화된다.

4) 주어진 노즐사양, 연소실 형상에 의해 Smoke 및 연료소모량을 최소화 할 수 있는 Rail 압력 및 분사조절이 요구된다.

참 고 문 헌

- 1) 류명석, 승용차용 HSDI디젤엔진개발, G7 1단계보고서, 1999.
- 2) J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw Hill, pp.529-540, pp.635-648, 1988.
- 3) N. Ladommatos, R. A. Balian, and R. Stone, "Analysis of in Unsteady Flow and its Effects on Diesel Combustion", SAE 921643, 1992.
- 4) 신범식, 이석영, 전광민, " 6기통 압축착화 기관의 단일 영역 열방출량 계산", 한국 자동차공학회 논문집 제4권 제1호, pp.147-154, 1996.
- 5) P. L. Herzog, "Staus und Potential der Einspritzraten Verlaufsformung am schnelllaufenden direkteinspritzenden Diesel motor", MTZ, pp.700-705, 1996.12.
- 6) G. Stumpp and Ricco, "Common Rail-An Attractive Fuel Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines" , SAE 960870, 1996. 1996.