

# 초고압 분사 압력 적용에 따른 단기통 디젤 엔진에서의 연소 및 배기 특성에 관한 연구

조원규\* · 강승우\* · 배충식\*<sup>†</sup> · 김영호\*\*

## Effect of Ultra-high Injection Pressure on Combustion and Emission Characteristics in a Single-cylinder Diesel Engine

Wonkyu Cho\*, Seungwoo Kang\*, Choongsik Bae\*<sup>†</sup>, Youngho Kim\*\*

### ABSTRACT

Experimental study was conducted to investigate the effect of ultra-high injection pressure on combustion and emission characteristics in a single-cylinder diesel engine. Electronically controlled ultra-high pressure fuel injection system consistently supplied the fuel of ultra-high pressure up to 250 MPa. Various injection pressures, 40 to 250 MPa, were applied and compared. A injector with eight identical nozzle holes which have diameter of 105  $\mu\text{m}$  was used. The results showed high potential to improve the nitrogen oxide (NOx) and particulate matter (PM) trade-off relationship with an ultra-high injection pressure and the exhaust gas recirculation (EGR).

**Key Words** : Ultra-high injection pressure, Single-cylinder Diesel Engine, Nitrogen oxide (NOx), Particulate matter (PM), Exhaust gas recirculation (EGR)

최근 디젤 엔진은 높은 열효율과 토크 특성으로 인해 승용차 시장에서 널리 사용되고 있다. 하지만, 디젤 엔진에서 질소 산화물(NOx, nitrogen oxides)과 입자상 물질(PM, particulate matter)이 상대적으로 많이 배출된다. 따라서 점점 엄격해지는 배기규제를 만족하기 위해 다양한 연료 분사 및 연소 기술 전략이 적용되고 있다. 특히, 선진 자동차 부품 업체들은 질소 산화물과 입자상 물질의 배출을 동시에 저감하고 연비를 개선하기 위하여 더 높은 분사 압력을 가지는 분사기와 분사 시스템을 지속적으로 개발하고 있다. 향후 더욱 엄격해지는 배기 규제를 만족하고 지속적인 연비 개선을 위하여 200 MPa 이상의 분사 압력이 요구되어질 것으로 예상된다.<sup>[1-3]</sup>

예전부터 분사 압력에 따른 연소 특성에 대한 연구는 활발하게 진행되었다.<sup>[4-7]</sup> 높은 분사 압력을 적용할 경우, 분사되는 연료 입자의 크기가 작아지고 분무에 유입되는 공기의 양이 증가하여 입자상 물질의 배출은 크게 감소하는 효과를 보였다.<sup>[4]</sup> 하지만, 분사 압력의 증가에 따라 질소

산화물은 증가하여 질소 산화물과 입자상 물질 간에 trade-off 관계가 있음을 밝혔다.<sup>[5-7]</sup>

이와 같은 과거 연구들은 대부분 200 MPa 이하의 분사 압력에서 분사 압력에 따른 연소 특성을 연구한 것으로, 향후 적용될 200 MPa 이상의 분사 압력 조건에서의 연소 및 배기 특성에 대한 연구 사례는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 엔진에 적용이 가능한 정밀한 전기 제어 방식(common-rail system)의 초고압 분사 시스템과 250 MPa의 초고압 분사가 가능한 분사기를 이용하고, 질소 산화물 저감을 위한 배기가스 재순환 기술(EGR, exhaust gas recirculation)을 적용하여 200 MPa 이상의 분사 압력 적용에 따른 연소 및 배기 특성을 밝히고자 한다. 그리고 본 실험 결과를 토대로 200 MPa 이상의 초고압 분사 적용의 타당성을 평가하고자 한다.

Figure 1은 250 MPa의 분사 압력을 달성하기 위한 연료 분사 장치의 구성도이다. 특히, 본 연구에서는 기존의 디젤 엔진의 연료 분사 시스템과 동일한 방식으로 고압 펌프의 속도와 분사 압력을 정밀하게 제어할 수 있도록 연료 분사 장치를 구성하였다. 연료의 분사 압력은 PCV Driver (Zenobalti, ZB-1200B)를 이용하여 250 MPa 까지 정밀하게 제어하였다. 그리고 연료의 분사 시

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 현대자동차 선형디젤엔진개발팀

<sup>†</sup> 연락저자, csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3063 FAX : (042)-350-5024

기, 분사량과 분사기에 필요한 전류는 Engine controller (Zenobalti, ZB-9013)와 Universal Injector Drive (Zenobalti, ZB-5010)를 이용하여 제어하였다.

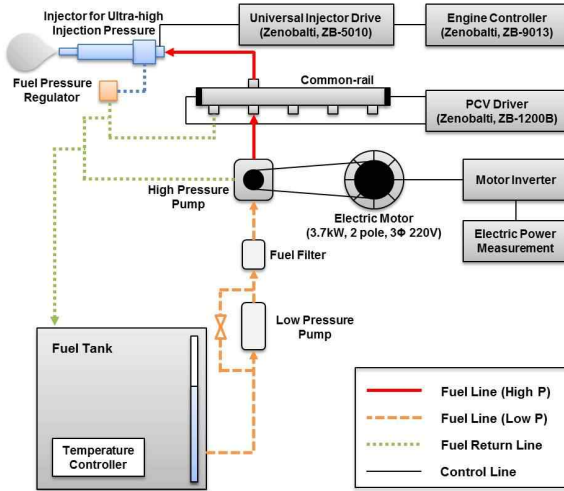


Fig. 1 Schematic diagram of electrically controlled ultra-high pressure fuel injection system

본 실험에서는 4기통 1.6 L 직접분사식 디젤 엔진을 개조한 단기통 엔진을 이용하였다. Table 1은 본 연구에 사용한 단기통 엔진의 제원이다. 단기통 엔진의 보어는 77.2 mm 이고, 스트로크는 85.8 mm 이고, 배기량은 401 cc 이며, 압축비는 16.24 이었다. Table 2는 본 연구에서 사용한 분사기의 제원이다. 홀 직경이 105  $\mu\text{m}$  이고, 총 8 개의 홀을 가진 솔레노이드 방식의 분사기를 이용하였다.

Table 1 Specifications of the test engine

Number of cylinder	Single
Injection type	Direct injection
Valve per cylinder	4
Intake valve opening [CAD bTDC]	6
Intake valve closing [CAD aBDC]	34
Exhaust valve opening [CAD bBDC]	46
Exhaust valve closing [CAD aTDC]	4
Bore $\times$ Stroke [mm]	77.2 $\times$ 85.8
Injection system	Common-rail
Compression ratio	16.24 : 1
Displacement [cc]	401

Table 2 Specifications of Diesel Injector

Number of hole	8
HFR [cc/min@10MPa]	560
Hole diameter [ $\mu\text{m}$ ]	105
Hole length [ $\mu\text{m}$ ]	620
Included angle [ $^\circ$ ]	153
k-factor	1.5

엔진 속도는 직류 동력계 (82 kW)를 이용하여 일정하게 제어하였다. 로터리 인코더 (Autonics, E40S)는 크랭크축에 설치되었다. 실린더 내 압력은 피에조 압력 센서 (Kistler, 6056A)와 전하 증폭기 (Kistler, 5011)를 이용하여 0.2 CAD 간격으로 측정하였다. 실린더 내 압력의 100회 평균을 통해 열방출율을 계산하였다. 질소 산화물, 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC)와 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 포함한 배기 배출물은 배기가스 분석기(Horiba, MEXA 1500D)를 통해 측정하였다. 엔진에서 배출되는 입자상 물질은 smoke meter (AVL, 415S)를 이용하여 측정하였다.

본 연구의 실험 조건은 Table 3과 같다. 디젤 단기통 엔진은 1800 rpm의 엔진 속도로 구동하였고, 냉각수 온도는 353 K로 유지하였다. 연료의 분사 압력은 40 MPa부터 250 MPa까지 적용하였으며, 각 분사 압력 조건에서 디젤 연료의 분사량은 15 mg/cycle로 고정하였고, 이때 연료 온도는 313 K로 유지하였다. 분사 시기는 -24 CAD aTDC 에서 0 CAD aTDC 까지 3 CAD(EGR 0%)나 6 CAD(EGR 10, 20, 30%) 간격으로 변화를 주었다. 배기가스 재순환(EGR, exhaust gas recirculation) 비율은 각 분사 압력 조건에서 0%부터 30%까지 변화를 주었다. 배기가스 재순환 비율은 식(1)과 같이 정의되어 진다. [CO<sub>2</sub>]<sub>in</sub>는 흡기 매니폴드의 이산화탄소 농도이고, [CO<sub>2</sub>]<sub>ex</sub>는 배기 매니폴드의 이산화탄소 농도이며, [CO<sub>2</sub>]<sub>amb</sub>는 주변 공기의 이산화탄소 농도이다.

$$\text{Total EGR rate (\%)} = \frac{[\text{CO}_2]_{in} - [\text{CO}_2]_{amb}}{[\text{CO}_2]_{ex} - [\text{CO}_2]_{amb}} \times 100 \quad (1)$$

Table 3 Experimental conditions

Engine speed [rpm]	1800
Injection pressure [MPa]	40 to 250
Injection timing [CAD aTDC]	-24 to 0
Injection quantity [mg/cycle]	15
Total EGR rate [%]	0, 10, 20, 30
Fuel temperature [K]	313
Coolant temperature [K]	353

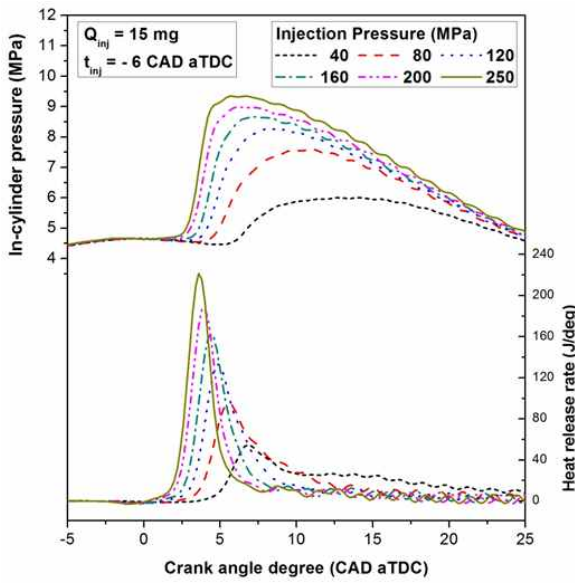


Fig. 2 Comparison of in-cylinder pressure and heat release rate with different injection pressure

Figure 2는 분사 압력에 따른 연소 압력과 열 방출율을 나타낸다. 15mg의 디젤 연료의 분사 시기는 -6 CAD aTDC 로 고정하였다. 분사 압력이 증가할수록 최대 연소 압력은 상승하였는데, 분사 압력 40 MPa 대비 250 MPa 에서 최대 연소 압력은 약 3.3 MPa 높았으며, 연소 압력이 더 급격하게 상승하였다. 열방출율 곡선을 살펴보면, 분사 압력이 증가할수록 더 급격하게 열방출율이 증가하였고, 짧은 기간 내에 열방출이 진행되었으며, 최대 열방출율 또한 더 높은 값을 가졌다. 분사 압력 40 MPa 대비 250 MPa 에서 최대 열방출율은 약 4 배 이었으며, 최대 열방출율을 기록한 시기는 3.2 CAD 만큼 더 빠르게 나타났다. 이와 같은 결과는 분사 압력이 높을수록 최대 분사율이 더 크기 때문에 상대적으로 짧은 시간에 동일한 양의 연료를 실린더 내로 분사할 수 있고, 분사 압력이 높을수록 더 높은 분무의 운동에너지로 인해 주변 공기와 연료의 혼합을 촉진시켜 균질한 혼합기를 더 빠르게 형성시킬 수 있었기 때문이다.<sup>[8]</sup>

Figure 3은 분사 압력과 EGR 율에 따른 연소 압력과 열방출율을 나타낸다. EGR 0%와 EGR 20% 조건 모두에서 분사 압력이 증가할수록 최대 연소 압력은 증가하였으며, 동일한 분사 압력에서 높은 EGR 율을 적용하면 최대 연소 압력은 감소하였다. 특히 분사 압력 250 MPa에서는 EGR 율을 0%에서 20%로 증가시킨 경우, 최대 연소 압력은 0.4 MPa 감소하였다. 또한, 동일한 분사 압력에서 EGR 율을 증가시킨 경우 착화 지연이 발생하였고, 분사 압력 250 MPa 조건에서 EGR 율을 0%에서 20%로 증가시켰을 때 착화

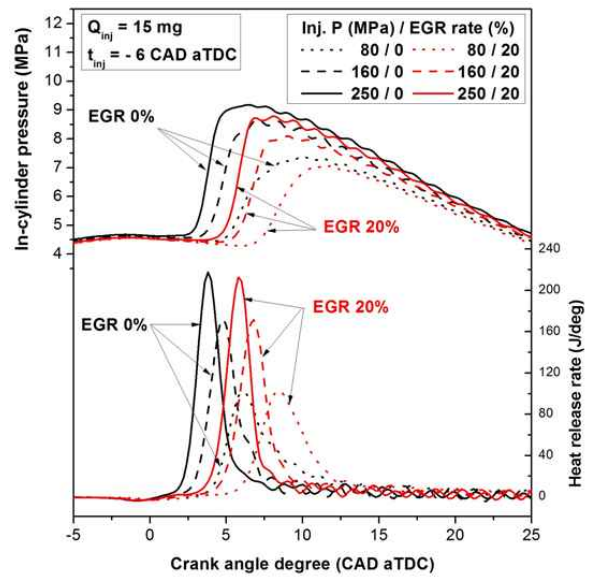


Fig. 3 Comparison of in-cylinder pressure and heat release rate with different injection pressure and EGR rate

지연 기간은 1.8 CAD 만큼 증가하였다. 또한, 각 분사 압력에서 EGR 율을 0%에서 20%로 증가시켰을 때, 최대 열방출율 시기도 약 2 CAD 만큼 씩 지각되었다. 분사 압력이 증가함에 따라 최대 열방출율은 상승하였고, EGR 적용 유무와 관계 없이 동일 분사 압력에서 최대 열방출율은 큰 차이가 없었다.

Figure 4는 분사 압력에 따른 질소 산화물과 입자상 물질의 배출량을 나타낸다. 분사 압력이 증가할수록 질소 산화물의 배출은 지속적으로 증가하였으며, 입자상 물질은 감소하였다. 하지만, EGR을 적용하지 않는 경우, 분사 압력 120 MPa 이상에서는 입자상 물질의 저감 효과가 크게 감소하였다.<sup>[5]</sup>

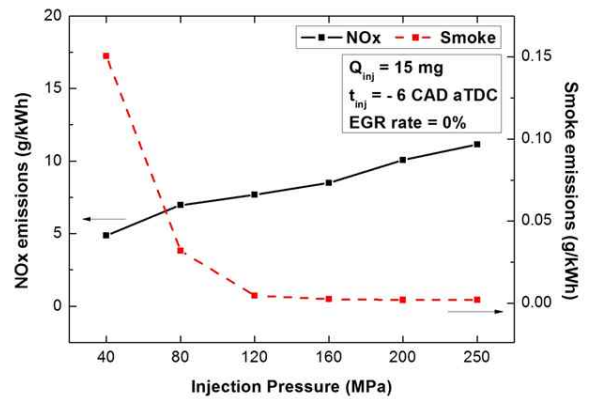


Fig. 4 NOx and smoke emissions with different injection pressures at EGR 0%

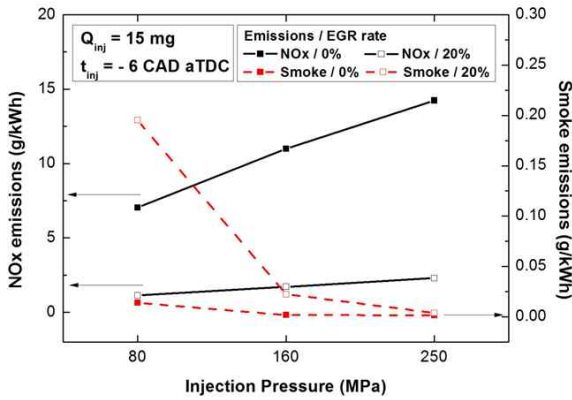


Fig. 5 NOx and smoke emissions with different injection pressures and EGR rates

Figure 5는 분사 압력과 EGR 율에 따른 질소 산화물과 입자상 물질의 배출량을 나타낸다. EGR 0%와 20% 조건 모두에서 분사 압력이 증가하면 질소 산화물의 배출은 증가하고, 입자상 물질의 배출은 감소되었다. EGR 0% 조건에서 분사 압력이 160 MPa에서 250 MPa로 증가한 경우, 질소 산화물이 3.2 g/kWh 증가하는 동안 입자상 물질은 12% 저감되었다. 반면, EGR 20% 조건에서는 질소 산화물이 0.6 g/kWh 증가하는 동안 입자상 물질이 82% 저감되었다. 따라서 200 MPa 이상의 초고압 분사는 높은 EGR 율을 적용할 때 배기 저감 효과를 극대화 하였다.

Figure 6은 분사 압력과 EGR 율에 따른 질소 산화물과 입자상 물질의 상반 관계를 나타낸다. 질소 산화물 저감을 위해 EGR 율을 증가시킬 경우, 입자상 물질의 배출이 증가하게 되는데, 이와 같은 상반 관계를 분사 압력을 증가시키기에 따라 개선시킬 수 있었다.<sup>[9]</sup> 특히, 더 높은 EGR 율을 적용할 때 개선 효과가 두드러졌다.

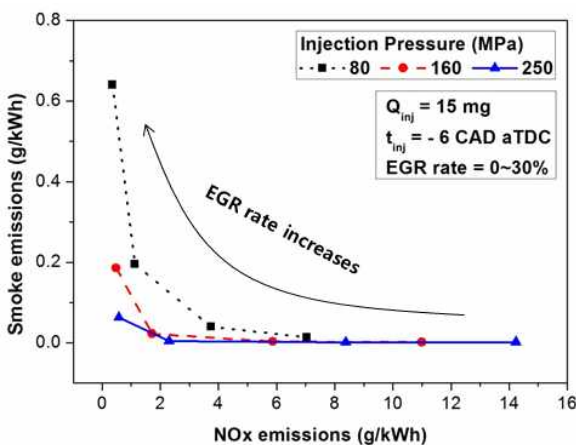


Fig. 6 Trade-off of NOx and smoke emissions with different injection pressures and EGR rates

## 후 기

본 연구는 현대자동차 산학 과제 및 현대자동차 공동연구실 제도의 일환으로 현대자동차 선형 디젤엔진개발팀과 수행된 연구로, 현대자동차의 기술적, 재정적 지원을 받아 수행되었습니다. 현대자동차에 감사의 뜻을 포함합니다.

## 참고 문헌

- [1] J. Beduneau, C. Cardon, G. Meissonnier, M. Bona, P. Voigt, P. Bercher, H. Schiffgens, "Delphi New Diesel Common Rail System Family", 2014 Wiener Symposium, 2014.
- [2] T. Lengenfelder, C. Barba, J. Gerhardt, R. Maier, L. Schmid, M. Stengele, "Designing the Future - Efficient BOSCH Fuel Injection Systems for Commercial Vehicles", 2014 Wiener Symposium, 2014.
- [3] K. Takeuchi, Y. Shinohara, A. Kojima, K. Ishizuka, K. Uchiyama, M. Nakagawa, O. E. Herrmann, "Further Innovations for the Diesel Engine Management and Aftertreatment System", 2015 Wiener Symposium, 2015.
- [4] W. Zhang, J. Tian, K. Nishida, "Effects of Nozzle Hole Diameter and Injection Pressure on Flame Lift-Off and Soot Formation in D.I. Diesel Combustion", SAE Technical Paper 2011-01-1813, 2011.
- [5] T. Su, C. Chang, R. Reitz, P. Farrell, A. Pierpont, T. Tow, "Effects of injection pressure and nozzle geometry on spray SMD and DI emissions", SAE Technical Paper 952360, 1995.
- [6] P. Karra, S. Kong, "Diesel Emission Characteristics Using High Injection Pressure with Converging Nozzles in a Medium-Duty Engine", SAE Int. J. Fuels Lubr. 1(1):578-592, SAE Paper 2008-01-1085, 2009.
- [7] F. Tao, P. Bergstrand, "Effect of Ultra-High Injection Pressure on Diesel Ignition and Flame under High-Boost Conditions", SAE Technical Paper 2008-01-1603, 2008.
- [8] W. Cho, Y. Park, C. Bae, J. Yu, Y. Kim, "Effects of Ultra-High Injection Pressure and Micro-Hole Nozzle on Diesel Spray Characteristics under Evaporating Condition", 13th ICLASS-2015, Tainan, Taiwan, 2015.
- [9] R. Judge, "Delphi Diesel Common Rail System development for Medium Duty commercial vehicles", 12th HKIPC, 2012