

분할 분사시기 변화에 따른 직분식 디젤엔진의 연소 특성

연인모¹⁾ · 노현구¹⁾ · 이창식²⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Combustion characteristics of DI diesel engine according to various timings of split injection

In Mo Youn¹⁾ · Hyun Gu Roh¹⁾ · Chang Sik Lee²⁾

연인모¹⁾ · 노현구¹⁾ · 이창식²⁾

¹⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT

This paper describes the effect of the split injection on combustion and emission characteristics in a common rail diesel engine at various operating conditions. The combustion pressures and exhaust emissions such as NO_x and soot were measured at various split injection timings. The experimental apparatus of this study is composed of 4 cylinder engine installed with piezoelectric pressure sensor, EC dynamometer, and exhaust gas analyzer for the measurement of NO_x, CO, HC and soot emissions.

Results show that the split injection has a great effect on reducing the rapid premixed combustion and NO_x emissions.

Key Words : Split injection, Combustion characteristics, Emission characteristics, NO_x, Soot

기 호 설 명

t_{main}	Main injection timing	EMS	Engine management system
t_{xlot}	Split injection timing	TDC	Top dead center
COV	Coefficient of variation	P_{max}	Pressure maximum

1. 서 론

각종 연소장치 및 자동차로부터 나오는 유해가스에 의한 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비, 대기오염 등의 환경 공해가 심각한 사회 문제로 대

두됨에 따라 자동차의 유해 배출물 저감은 자동차 산업에서 매우 중요한 연구 방향이 되고 있다.

특히 유럽 등에서는 승용차에 디젤엔진의 탑재 비율이 증가하는 추세에 있다. 따라서 열효율이 높아 CO₂ 배출량이 적은 디젤엔진을 개발하기 위해 활발한 연구가 진행되고 있다. 국내의 경우도 또한 국제 유가 상승 및 차량 유지비에 대한 유류비 부담이 증가하면서 디젤엔진 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 그러나 디젤엔진은 가솔

* 한양대학교 대학원

† 연락처자, cslee@hanyang.ac.kr

** 한양대학교 기계공학부

린엔진에 비하여 연소과정에 발생하는 소음과 진동의 발생이 높아 승차감이 나쁜 문제점이 있다.

이에 대한 대안으로 주 분사 전에 소량의 연료를 분사하여 주 분사 연료의 급격한 예혼합 연소를 방지하는 분할 분사기술이 널리 적용되고 있다[1~5]. 분할 분사는 부분 연소를 이용 주 분사의 점화 지연을 줄여주어 착화가 효과적으로 일어나도록 도와주는 역할을 한다. 그러나 분할 분사와 주 분사까지의 간격이 너무 짧거나 분할 연료가 연소가 되지 않는 경우는 soot의 발생이 증가한다고 알려져 있다[6].

따라서 본 연구에서는 커먼레일 디젤엔진에서 분할 분사가 연소 안정화 및 배출가스 배출에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 분할 분사의 유무, 분할 분사의 횟수와 시기를 변화시켜 이들 인자의 영향을 실험적으로 분석하도록 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

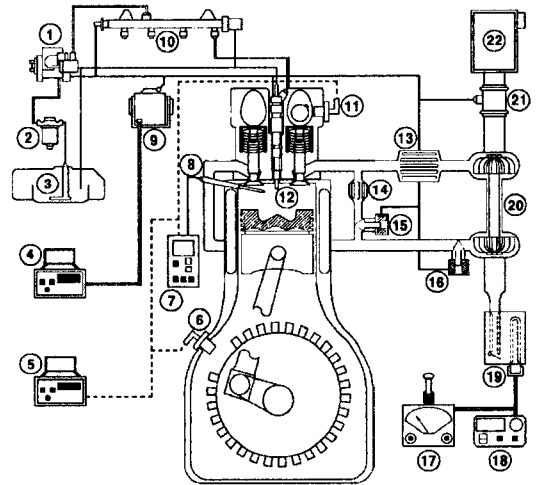
2.1 실험 장치

본 연구에서는 배기량이 1,500cc이며 가변 용량 제어 터보차저와 고압분사기술 등을 통하여 유럽의 배기규제인 EURO-IV 기준을 만족시키는 4기통 커먼레일 디젤엔진이 적용되었다. 엔진의 압축비는 17.8이며 엔진의 주요 제원은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of test engine

Engine type	4-stroke turbo-charged DI diesel engine
Number of cylinder	4
Bore × Stroke (mm)	75 × 84.5
Displacement volume (cc)	1,493
Fuel injection system	Bosch common rail
Valve type	DOHC 4 valves per cylinder
Compression ratio	17.8
Engine management system	Bosch system
Max. power (kW/rpm)	82.5 / 4,000
Max. torque (N·m/rpm)	240 / 2,000
Max. speed (rpm)	4,750

Fig. 1은 엔진 및 주요실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 분할 분사 유무와 시기, 횟수 등을 제어하기 위한 소프트웨어(ETAS사 INCA)와 EMS 장치(ETK EDC ECU)가 사용되었다. 또한 엔진의 연소압력을 계측하기 위해 글로 플러그 위치에 압력 센서를 설치하여 장착하여 연소압력의 측정이 가능하도록 하였으며, 엔진의 크랭크 각도의 계산을 위해 크랭크 위치 센서(Crank position sensor)와 캠축 위치 센서(Camshaft position sensor)를 이용하였다. 연소실 압력은 1 사이클당 14,000개의 데이터를 취득하였으며 100 사이클의 데이터를 평균하여 사용하였다. 실험에 필요한 데이터를 취득하기 위해서 LabVIEW 언어로 작성된 프로그램을 이용하였으며, 광 투과식의 soot 측정기와 NO_x, HC, CO 분석기를 이용하여 배출가스를 측정하였다.



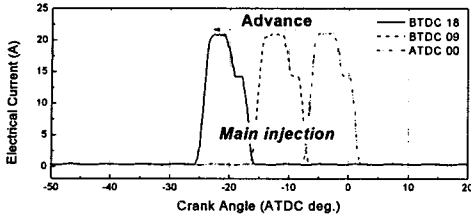
1. High pressure pump, 2. Fuel filter, 3. Fuel tank, 4. Engine control system (INCA Software), 5. Data acquisition system, 6. Crankshaft position sensor, 7. Charge amplifier, 8. Combustion pressure sensor, 9. ECU (ETK EDC 16), 10. Common rail, 11. Camshaft position sensor, 12. Injector, 13. Intercooler, 14. EGR-cooler, 15. E-GR valve, 16. VGT actuator, 17. Soot analyzer, 18. Emission analyzer, 19. Muffler, 20. Variable geometry turbocharger, 21. Air flow meter, 22. Air cleaner

Fig 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

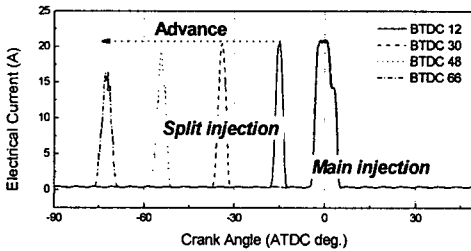
2.2 실험 방법

분사 형태를 Fig. 2와 같은 조건으로 측정하였다.

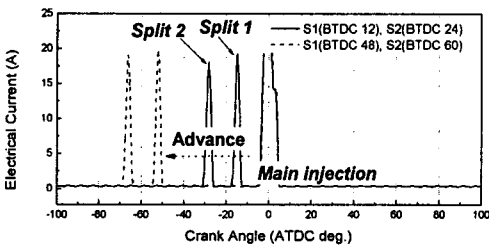
Case 1



Case 2



Case 3



- Case 1: only one main
- Case 2: one split and one main
- Case 3: two split injection and one main

Fig. 2 Injection profile and test method.

Case 1은 분할 분사가 없는 주 분사만을 ATDC 9°부터 BTDC 18° 사이를 3° 간격으로 실험을 실시하였다.

Case 2는 주 분사와 한번의 분할 분사만을 분사하도록 하였다. 주 분사는 ATDC 3°에 고정하고 분할 분사를 BTDC 90°까지 진각하며 BTDC 12° 부터 실시 18° 간격으로 실험을 실시하였다.

Case 3은 주 분사와 두 번의 분할 분사를 분사하도록 하였다. 주 분사는 Case 2와 같은 방법으로 ATDC 3°에 고정, 분할 1과 2사이를 12° 고정하고 분할 1과 주 분사 사이를 18° 간격으로 실험을 실시하였다.

모든 실험 조건으로 엔진 회전수는 2000rpm, 부하는 100N·m에 고정하여 실험하였으며 각종 실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Operating condition

Engine speed	2,000 rpm
Engine load	100 N·m
Total injection quantity	22 mg/stroke
Injection pressure	100 MPa
Booster pressure	150 kPa
Intake / water temperature	60 / 80 °C

3. 실험 결과

주 분사시기와 분할 분사시기, 횡수 등에 대한 실험을 수행하였으며, 주 분사시기는 ATDC 3°를 기준으로 하여 분할 분사의 영향을 알아보도록 하였다.

3.1 주 분사만 시행한 경우 연소 특성 및 배출가스에 미치는 영향

디젤엔진에서 연료의 분사시기는 엔진의 성능 및 배기특성에 미치는 중요한 변수로 작용하게 된다. Fig. 3은 분할 분사 없이 주 분사만 시행한 경우에 분사시기의 변화에 따른 연소압력특성을 나타낸 것이다. 분사의 시작 시기는 동기신호에 의해 인젝터에 전류가 흐르기 시작하는 시점 (start of energizing)을 기준으로 하였다.

분사시기가 진각됨에 따라 최고연소압력이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 연소압력의 증가는 엔진출력향상에는 기여할 수 있지만 피스톤 및 엔진의 커빅팅 로드, 크랭크 축 등에 부하를 가중시키는 단점을 가져오게 된다.

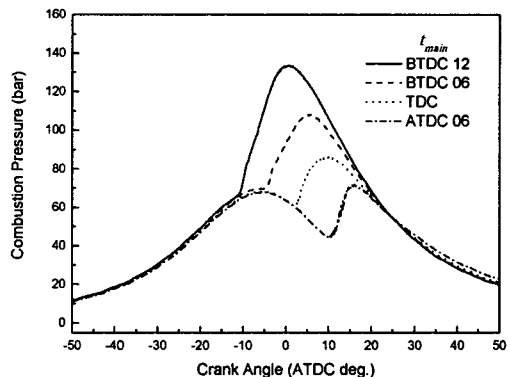


Fig. 3 Effect of main injection on combustion pressure for different main injection timings.

Fig. 4는 분사시기의 변화에 따른 최고연소압력 및 최고연소압력의 변동율($COV_{P_{max}}$)을 나타낸 것이다. 최고연소압력은 분사시기가 늦춰질수록 선형적으로 낮아지는 결과를 보이고 있으며, $COV_{P_{max}}$ 는 ATDC 3° 부터 BTDC 12°까지는 비교적 완만하게 감소하다가 BTDC 15°에서는 급격하게 변동량이 높아지는 경향을 보이고 있다. 이는 각 사이클마다의 연소가 불안정해 짐을 보여주는 것으로 엔진의 진동 또한 급격하게 증가하게 된다. 분사시기가 ATDC 3° 이후로 지각시키면 최고연소압력 변동률은 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있다.

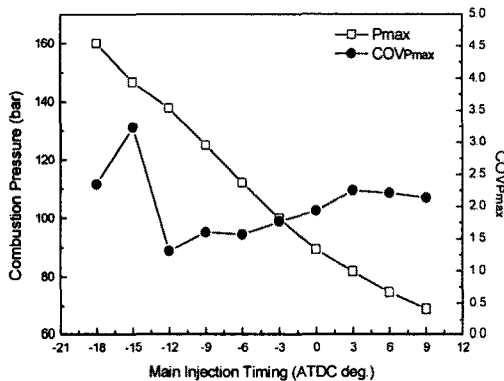


Fig. 4 Effect of main injection timing on the characteristics of engine performances.

Fig. 5에서 배기가스 배출량을 살펴보면 분사시기를 진각시키에 따라 매연과 NO_x 가 같이 증가하는 경향을 보이고 있다. 분사시기가 진각되면 최고연소압력 및 연소실 온도가 높아지게 되어 NO_x 의 생성이 증가하게 되며, TDC 이전에 연소가 시작됨에 따라 NO_x 가 형성되기 쉬운 고온의 연소가스에 노출되는 시간이 증가하게 되어 NO_x 배출량이 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

일반적으로 저압 분사의 경우에는 분사시기가 지연됨에 따라서 확산연소기간이 증가하여 soot의 배출이 증가한다고 알려져 있으나, 본 연구의 결과에서는 분사시기가 지연될수록 soot의 배출량이 감소하는 것으로 나타났다.

3.2 한번의 분할 분사가 연소 특성 및 배출가스에 미치는 영향

Fig. 6은 주 분사를 ATDC 3°로 고정하고 분할 분사시기를 변화시킨 경우에 대한 최고연소압력과 최고연소압력 변동률을 나타낸 것이다. 분할 분사는 주 분사 전에 화염원을 형성하여 주 분사 연료의 착화를 촉진하고 착화지연기간을 단축시킨다. 이러한 분할 분사의 효과는 분할 분사

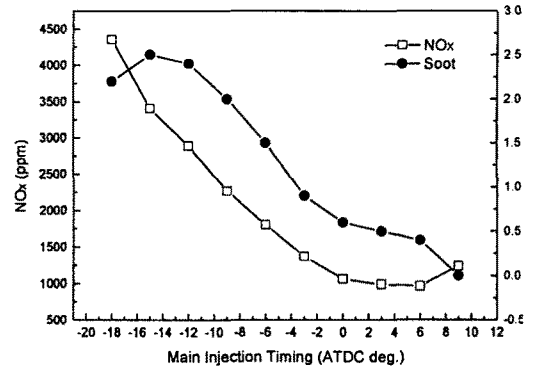


Fig. 5 Effect of main injection timing on the exhaust emissions.

시기가 진각 될수록 낮아지게 된다.

본 연구에서도 이러한 결과를 확인할 수 있으며, Fig. 6에서 나타난 바와 같이 최고연소압력은 분할 분사시기가 지각 될수록 높아지는 결과를 보이고 있다. 이것은 팽창행정인 TDC 이후(ATDC 3°)로 주 분사시기가 설정되어 있으므로 분할 분사에 의해 착화지연기간이 짧아져 최고연소압력이 증가하는 것으로 설명할 수 있다. 그러나 분할 분사시기가 진각 될수록 최고연소압력은 낮아지고 있다. 분할 분사시기가 지각되어 주 분사에 근접할수록 연소안정성을 나타내는 $COV_{P_{max}}$ 는 낮아지게 되어 연소가 안정적으로 나타나는 경향을 보이고 있다.

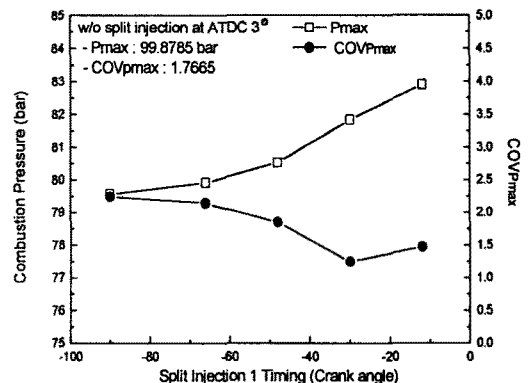


Fig. 6 Effect of one split injection timing on the characteristics of performance.

Fig. 7은 분할 분사시기의 변화에 따른 배기가스의 특성을 나타낸 것이다. 분할 분사시기가 BTDC 48°인 경우, NO_x 와 soot 배출량이 가장 낮은 것으로 나타났으며 이보다 분할 분사시기가 진각 되거나 지각되면 배출량은 증가하는 경향을

나타내고 있다.

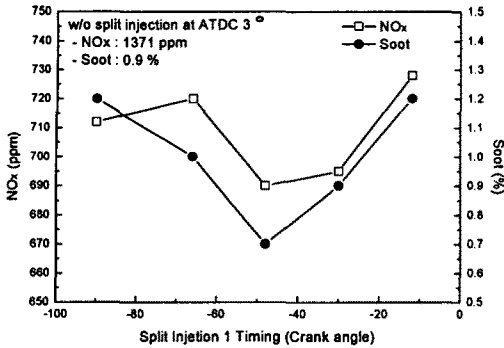


Fig. 7 Effect of one split injection timing on the exhaust emission.

3.3 2회의 분할 분사가 연소 특성 및 배출가스에 미치는 영향 (분할 분사 1 고정 분할 분사 2 변화)

Fig. 8은 주 분사는 ATDC 3°, 분할 분사 1을 주 분사 전 12도(BTDC 9°)에 고정을 하고 분할 분사 2의 분사시기를 변화 시키면서 최고연소 압력과 최고연소압력 변동률을 나타낸 것이다. 주 분사와 가까운 시기의 분사인 분할 분사 1의 시기가 고정되어 있어 분할 분사 2에 따른 효과는 그다지 크지 않은 것으로 나타났으나 COV_{Pmax}의 결과로 보아 분할 분사 2의 분사시기가 BTDC 24°로 지각된 경우의 연소가 가장 안정적임을 보여주고 있다.

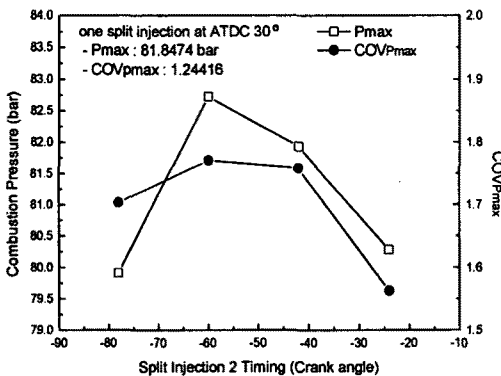


Fig. 8 Effect of two split injection timing on the characteristics of performance (fixed split injection 1 at BTDC 9°).

분할 분사 2의 변화에 따른 배출물 특성은 Fig. 9에 나타내었다. 배출물 특성도 연소 특성과 마찬가지로 분할 분사 2의 분사시기에 그다지 영

향을 받지 않고 있는 결과를 보이고 있다.

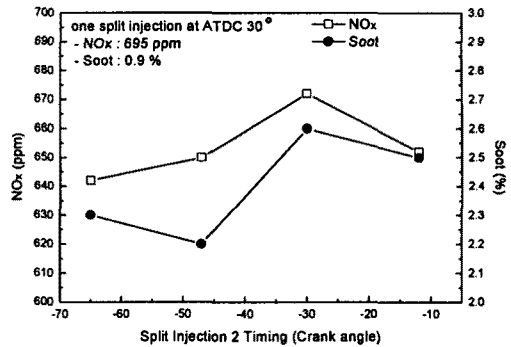


Fig. 9 Effect of two split injection timing on the characteristics of performance (fixed on split injection 1 at BTDC 9°).

3.4 두번의 분할 분사가 연소 특성 및 배출가스에 미치는 영향 (분할 분사 1 변화 분할 분사 2 고정)

Fig. 10은 주 분사는 ATDC 3°, 분할 분사 1과 2사이를 12°의 간격으로 고정 하고 분할 분사 1과 주 분사 사이의 분사시기를 변화시키면서 최고연소압력과 최고연소압력 변동률을 나타낸 것이다. 최고연소압력은 각각의 조건에서 변동이 그다지 크지 않은 것으로 보인다. 하지만 최고연소압력 변동률은 BTDC 30° 부근에서 가장 낮은 결과를 보이고 있다.

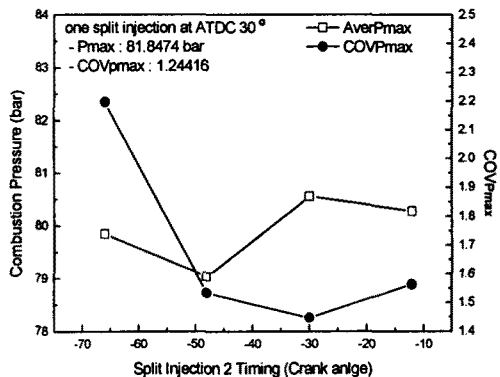


Fig. 10 Effect of two split injection timing on the characteristics of performance (fixed split injection 1 with split injection 2 at 12°).

Fig. 11은 배기가스의 특성에 대해서 나타낸

것이다. NO_x는 분할 분사시기가 주 분사에 가장 근접한 시점에서 가장 적게 배출되고 있으나 soot의 배출량이 급격히 증가하고 있다. 이것은 분할 분사와 주 분사의 간격이 과도하게 근접하게 되어 주 분사 연료가 충분히 예혼합 되지 못하고 확산연소 되어 발생한 것으로 보인다. 그러나 이보다 분할 분사가 진각된 영역에서는 NO_x의 배출량은 크게 변화가 없고 soot는 0.5% 이하로 아주 미미하게 배출되고 있다. 특히 주 분사와의 간격을 30°로 두었을 경우 soot는 거의 배출되지 않았다.

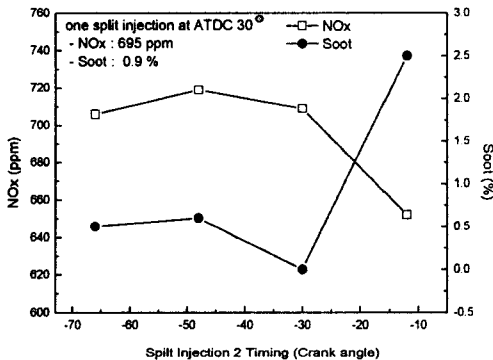


Fig. 11 Effect of two split injection timing on the characteristics of performance (fixed split injection 1 with split injection 2 at 12°).

4. 결론

분할 분사의 횟수, 분할 분사시기 등에 따른 커먼레일 디젤엔진의 연소 및 배출물 특성을 실험한 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1)한번의 분할 분사를 시행한 경우에서, 분할 분사시기가 지각되어 주 분사시기에 근접했을 때 최고연소압력 변동률이 낮아지게 되며, 이는 분할 분사의 시기를 지각시켰을 때 연소상태가 안정되는 것을 알 수 있다. 그리고 BTDC 48°에서 배기가스가 가장 적게 배출되는 것을 볼 수 있다.

2)2회의 분할 분사(분할 분사 1 고정, 분할 분사 2 변화)를 시행한 경우에서, 분할 분사 1이 지각되어 주 분사시기에 근접할수록 분할 분사 2로 인한 연소 안정화와 배기가스 배출량의 저감 효과를 얻을 수 없음을 알 수 있다.

3)2회의 분할 분사(분할 분사 1 변화, 분할 분사 2고정)를 시행한 경우에서, 분할 분사 1이 BTDC 30°인 경우에 최고연소압력 변동률이 가장 낮아지고, 배기가스의 배출량도 적어지는 것으로 나타났다으며, 특히 soot는 거의 배출되지 않는 것

로 나타났다. 이로부터 최적의 분사시점은 BTDC 30°임을 알 수 있다.

4)분할 분사를 실험함에 따라 연소는 안정화되고 배기가스, 배출량은 감소하는 경향을 보이고 있으나 분할 분사시기를 정확한 제어가 필요하다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-Star project (무·저공해자동차사업단)의 지원 및 교육 인적자원부, 산업 자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업부의 연구결과입니다.

참고문헌

[1] A. Henle, G. Bittlinger, C. Benz, J. Olaf Stein, T. Sattelmayer, "Homogeneous Operating Strategies in a DI Diesel Engine With Pent-Roof Combustion Chamber and Tumble Charge Motion: Studies on a Single-Cylinder Test-Engine and an Optical Access Engine", SAE Paper No.2005-01-0181.

[2] M. Badami, F. Mallamo, F. Millo and E. E. Rossi, "Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustion Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine", SAE Paper No.2002-01-0503.

[3] Badami, M., Millo, F., D'Amato, D. D., "Experimental Investigation on Soot and NOx Formation in a DI Common Rail Diesel Engine with Pilot Injection", SAE Paper 2001-01-0657, 2001.

[4] Augustin, U., Schwarz, V., "Low-Noise Combustion with Pilot Injection", Truck Technology International, 1991.

[5] Nehmer, D. A., Reitz R. D., "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions", SAE Paper 940668, 1994.

[6] A. Trueba, B. Barbeau, O. Pajot and K. Mokaddem, "Pilot Injection Timing Effect on the Main Injection Development and combustion in a DI Diesel Engine", SAE Paper No,2002-01-0501.