

커먼레일 디젤엔진에서 후분사 변화가 배출가스 성분 및 온도 변화에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

The experimental study of post injection effect on exhaust gas temperature and composition in a common rail DI diesel engine

정재욱*, 장동훈**, 박정규***, 전광민****
Jaewook Chung, Donghoon Chang, Jungkyu Park, Kwangmin Chun

Abstract

The post injection effect to enhance aftertreatment devices' performance is essential to meet future stringent emission standards by controlling exhaust gas temperature and emission pollutants. The test has been made with commercial common rail diesel engine by post injection manipulation, to optimize exhaust gas temperature while guarantee low fuel penalty. The optimization was done at 1500, 2000 and 2500[rpm] for 2, 4[bar] condition which show low exhaust gas temperature. The main purpose of this test is dedicated to understand mechanism of exhaust gas temperature rise while optimizing

주요기술용어 : common rail(커먼 레일), post injection(후분사), start of injection(분사 시기), injection time(분사 시간), exhaust gas temperature(배출 가스 온도), in-cylinder pressure(실린더 내 압력), heat release rate(열 방출률), particulate matter(PM, 입자상 물질), NO_x(질소 산화물)

1. 서론

가솔린 엔진 대비 상대적으로 뛰어난 열효율과 그로 인한 연비의 우수와 성능의 향상으로 인해 디젤 엔진에 대한 인기가 높아지고 있으나, 배출 가스 측면에서 상대적으로 높은 PM과 NO_x의 저감을 위해 해결해야 할 기술적 과

제 또한 아직도 많은 실정이다. 이를 위해 연료 압력의 고압화 및 연료 분사 과정의 전자화 및 제어 기술의 개선 등을 통한 연소 과정의 개선과 다양한 후처리 관련 기술의 개발이 진행되고 있으나 상용화에 적용하기 위한 기술적 과제 또한 많은 상황이다.

엔진 회전수와 부하에 독립적으로 연료 압력 및 연료 분사 제어를 자유롭게 할 수 있는 직접 분사식 커먼레일(common rail) 디젤 엔진의 경우 배출 가스의 후처리 장치와 결합하여 효과적인 배출 가스 저감의 역할을 수행할 수 있으나, 각각의 후처리 시스템들이 요구하는 운

* 건국대학교 대학원

** 연세대학교 대학원

*** 정희원, 건국대학교 기계공학부

**** 정희원, 연세대학교 기계공학부

전 조건 및 배출가스 온도 등을 최적화하기는 그리 쉽지 않고, 또한 디젤 엔진에 보편화되어 있는 과급 장치(터보 인터쿨러)도 배출가스의 온도 상승을 어렵게 만들기 때문에 최적화된 후분사 제어가 매우 중요하다.

본 연구에서는 NO_x의 저감을 목적으로 하는 촉매의 원활한 작동을 보장하기 위한 일정 온도 이상($\geq 300^{\circ}\text{C}$)의 원활한 제어를 위해서 연비에 불이익(fuel penalty) 최소화하는 수준에서 후분사의 최적화를 실시하였고, 이러한 후분사 변화에 따른 배출 가스 성분(PM 및 NO_x)의 변화를 상용 엔진에서 측정하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 엔진 제원

본 실험에서 사용한 엔진 및 실험 장치 구성에 대한 개요도는 Fig. 1에 그리고 엔진의 기본 제원은 Table 1에 나타 내었다.

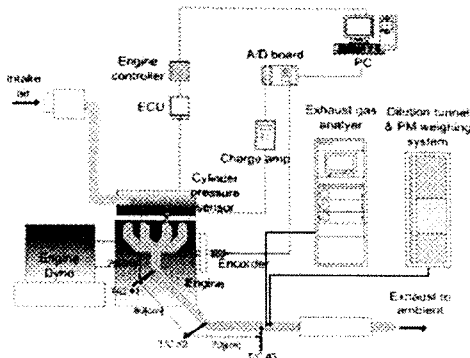


Fig. 1 Experimental setup

형식	직접분사 커먼레일, TCI
내경행정	83 92[mm]
배기량	1991[cc]
압축비	17.7:1
밸브타이밍 (열림/닫힘)	흡기 : 7[BTDC]/43[ATDC] 배기 : 52[BBDC]/6[ATDC]
고압펌프	Cam 구동형
연료레일	커먼레일식(1350[bar])
인젝터	Sac type, 5 holes
최대토크	259[Nm] @ 2000[rpm]
최대출력	85[kW] @ 4000[rpm]

Table 1 Engine and components specification

2.1 실험 장치 구성

캠축에 장착된 캠 포지션 센서에서 나오는 엔진의 TDC(Top Dead Center) 신호와 크랭크축에 설치된 크랭크 포지션 센서의 신호가 본 실험실의 엔진 controller에 입력되어 신호 처리된 후 정확한 분사 시기 및 연료 분사량을 조정하였다. 그리고 실린더 내 압력 신호 측정을 위해 글로우 플러그 장착 위치에 압력센서(6053A, 0 ~ 200[bar], Kistler)를 사용하였고, Injector 구동 전류를 current meter (LMA100, 한국 센서) 신호와 함께 P/C 상의 A/D board에 입력하여 데이터를 측정하였다. 그리고 배출 가스 온도의 측정을 위해 K-type 열전쌍(thermocouple)을 Fig.1에 나타난 배열로 설치하였고, 이 실험에서 언급된 주요 관심 온도 영역은 촉매 장착 위치로 적당한 T/C #2를 대상으로 하였다. 한편, 배출 가스의 측정을 위해 배기가스 분석기(MEXA 1500D EGR, Horiba)를, 그리고 PM 측정을 위해 diesel particulate weighing system(현민)과 dilution tunnel(HM-8178, 현민)을 사용하였다.

2.3 실험 범위

예비 실험을 통해 선정된 본 실험의 엔진 회전수는 1500, 2000, 2500[rpm]이고, 각 회전수에서 배출가스가 최종 목표 온도(350°C)에 미달하는 BMEP = 2, 4[bar] 기준으로 후분사 시간을 주분사 시간 기준으로 30, 50, 70, 90, 110[%]를 분사하여 목표 온도를 도달 시켰다. 후분사 시기는 ATDC 10, 25, 40, 55, 70, 84[°CA]을 기준으로 시험을 하였고, Fig. 2에 보여진 것과 같이 후분사의 변화를 주었다.

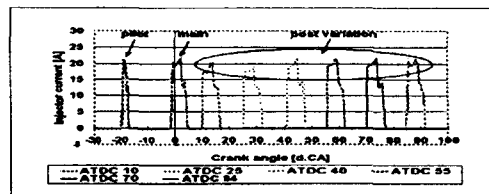


Fig. 2 Example, injector current variation at 1500[rpm], 2[bar] with post injection 110[%]

3. 실험 결과

3.1 후분사량과 후분사 시기 변화에 따른 배출 가스 온도 변화

배출 가스 온도의 상승은 후분사량과 후분사 시기에 직접적인 관계가 있기 때문에¹⁾, 최소한의 fuel penalty로써 기준 목표 온도 (350[°C])를 도달시키기 위해 다양한 후분사량 및 후분사 시기 조절을 통해 배출 가스 온도를 측정하였다.

Fig. 3, 4, 5에 각 엔진 회전수와 BMEP별로 후분사량 및 분사 시기의 변화에 기인하는 배출 가스 온도의 변화를 그래프로 나타내었다. 결과에서 보여지듯이 연료 분사량의 변화에 따른 온도 상승의 효과와 더불어 분사시기 조절에 따라 일정 구간(25~40[°CA])의 분사 시작 지점에서 온도 상승이 급격한 것을 볼 수 있었고, 그 구간 이후에는 온도가 오히려 하강하는 것을 관찰하였다.

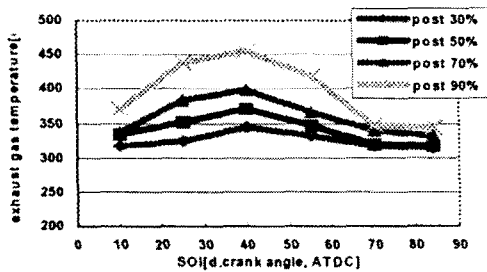


Fig. 3 Exhaust gas temperature vs. post injection quantity and start of injection with post injection(1500[rpm], 4[bar] of base temperature = 297[°C] without post injection)

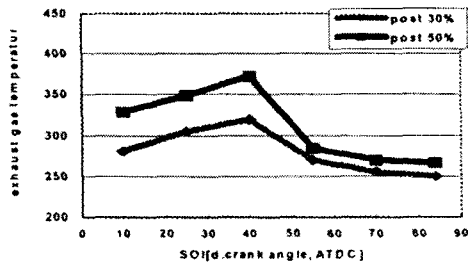


Fig. 4 Exhaust gas temperature vs. post injection quantity and start of injection with post injection(2000[rpm], 2[bar] of base temperature = 224[°C] without post injection)

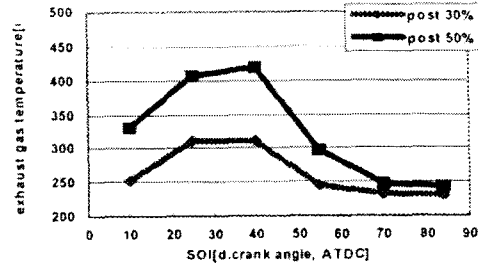


Fig. 5 Exhaust gas temperature vs. post injection quantity and start of injection with post injection(2500[rpm], 2[bar] of base temperature = 224[°C] without post injection)

3.2 후분사량과 후분사 시기 변화에 따른 PM-NOx 변화

전반적인 실험 결과는 전형적인 PM-NOx trade-off 관계를 보였으며, 후분사 시기에 따라 배기가스 온도가 최대가 되는 지점 이후에 NOx가 감소하고 PM이 급격히 증가하는 상관성을 보였다.

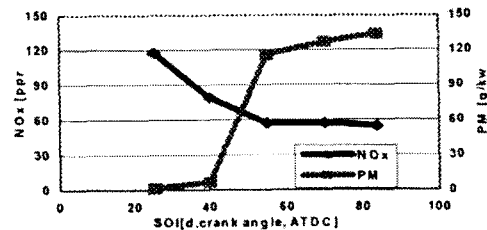


Fig. 6 PM-NOx profile vs. start of injection with post injection = 110[%] at 1500[rpm], 2[bar]

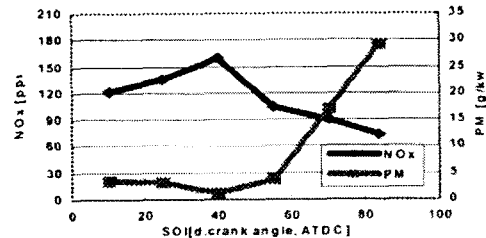


Fig. 7 PM-NOx profile vs. start of injection with post injection = 50[%] at 1500[rpm], 4[bar]

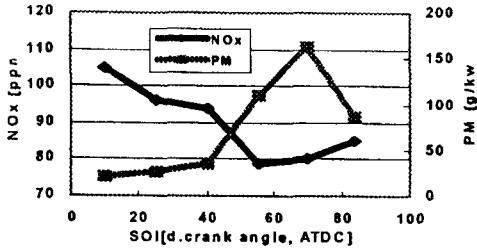


Fig. 8 PM-NOx profile vs. start of injection with post injection = 50[%] at 2000[rpm], 2[bar]

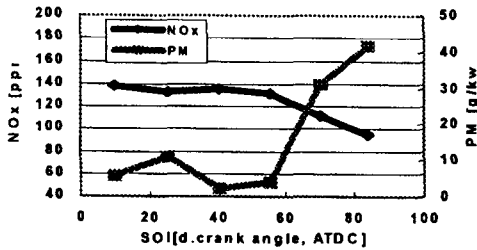


Fig. 9 PM-NOx profile vs. start of injection with post injection = 30[%] at 2000[rpm], 4[bar]

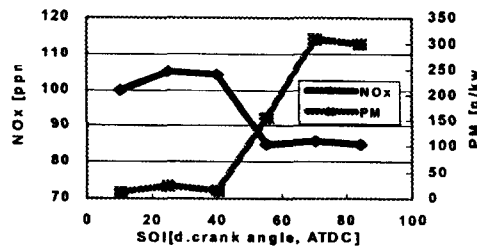


Fig. 10 PM-NOx profile vs. start of injection with post injection = 50[%] at 2500[rpm], 2[bar]

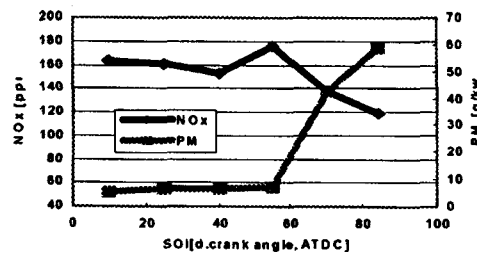


Fig. 11 PM-NOx profile vs. start of injection with post injection = 30[%] at 2500[rpm], 4[bar]

3.3 후분사량과 분사시기 변화에 따른 실린더 압력과 열 방출률의 변화

배출 가스 온도 변화와 PM-NOx 변화에 대한 결과 분석을 위해 실린더 압력의 측정과 열 방출률을 계산을 수행하였다. 각각의 그래프에서 굵은 선으로 표시된 부분은 온도 상승의 측면에서 최적화되어 목표 온도에 도달된 부분을 표시하였으며, 이 영역들의 경우 압력 그래프 및 열 방출률 그래프 모두 연소 말기 근방에서 압력 상승 및 급격한 열 방출률의 상승을 확인하였다. 이것은 late combustion 영역에서 주연소와 구분되는 연소가 발생하여 가스 온도 상승에 기여하는 것으로 생각되며, 이보다 지각시에는 연료가 연소 되지 못하고 배기쪽으로 배출되면서 상대적으로 가스 온도가 감소되는 것으로 판단된다.

한편 실험 중 late combustion 영역에서 연소한 경우 BMEP 및 엔진 torque가 상승하는 영향으로 인해 실험 기준 BMEP와 약간의 차이가 있었을 밝혀둔다.

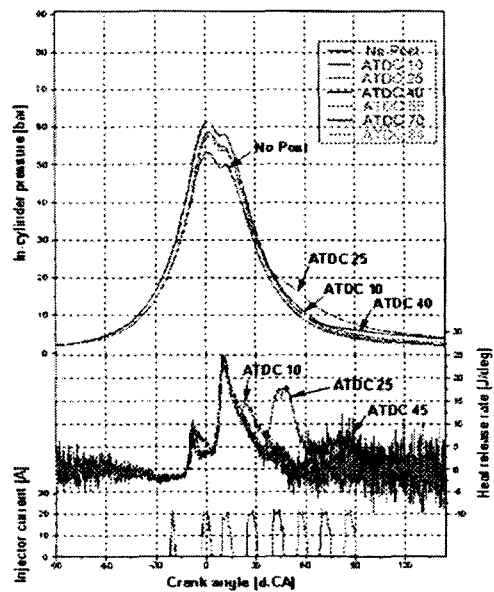


Fig. 12 In-cylinder pressure, Heat release rate & Injection current profile vs. start of injection with post injection = 110[%] at 1500[rpm], 2[bar](ATDC 25[°CA] optimized)

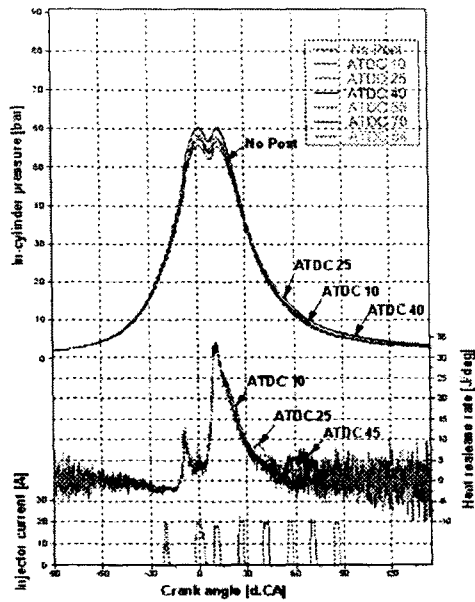


Fig. 13 In-cylinder pressure, Heat release rate & Injection current profile vs. start of injection with post injection = 50[%] at 1500[rpm], 4[bar](ATDC 40[°CA] optimized)

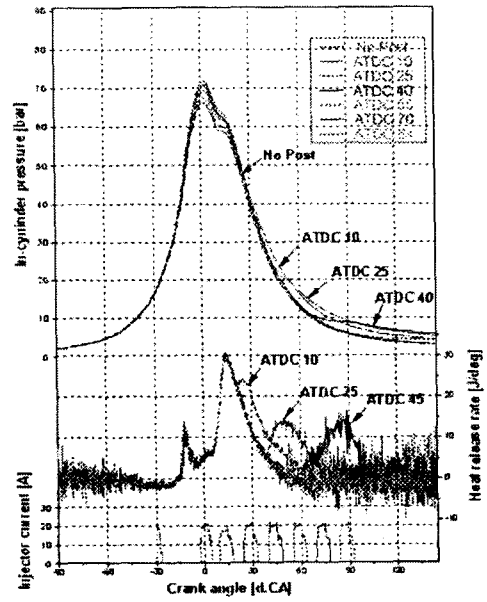


Fig. 15 In-cylinder pressure, Heat release rate & Injection current profile vs. start of injection with post injection = 30[%] at 2000[rpm], 4[bar](ATDC 40[°CA] optimized)

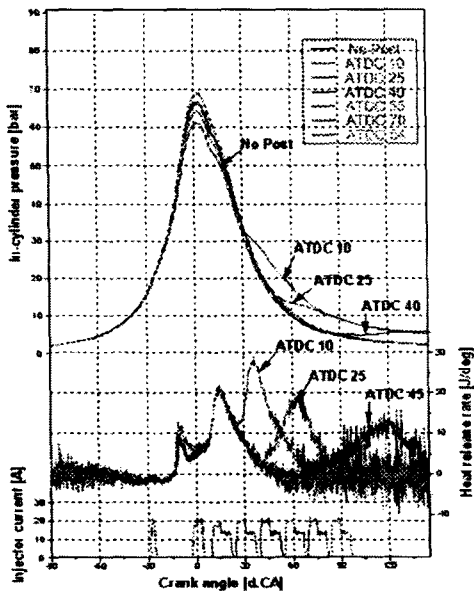


Fig. 14 In-cylinder pressure, Heat release rate & Injection current profile vs. start of injection with post injection = 50[%] at 2000[rpm], 2[bar](ATDC 40[°CA] optimized)

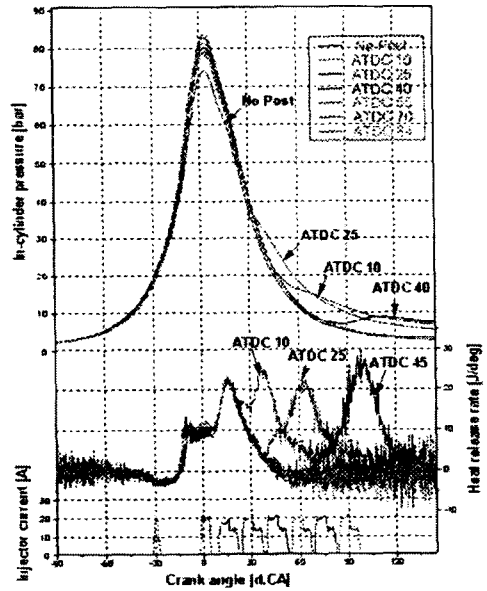


Fig. 16 In-cylinder pressure, Heat release rate & Injection current profile vs. start of injection with post injection = 50[%] at 2500[rpm], 2[bar](ATDC 40[°CA] optimized)

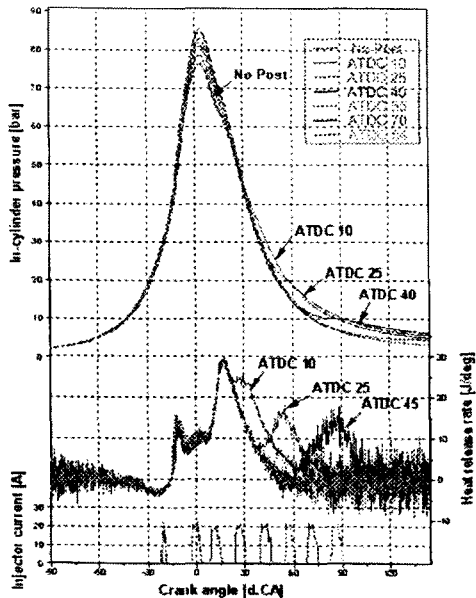


Fig. 17 In-cylinder pressure, Heat release rate & Injection current profile vs. start of injection with post injection = 30[%] at 2500[rpm], 4[bar](ATDC 40[°CA] optimized)

4. 결론

4기통 상용 커먼레일 디젤 엔진을 사용하여 후분사 최적화 실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 후분사량 및 후분사 시기 최적화를 통해 최소한의 fuel penalty로써 목표 배출 가스 온도로 상승시킬 수 있었다.

(2) 본 실험 영역에서 25~40[°CA] 연료 분사

시작 구간에서 최대한의 배출 가스 온도 상승 효과를 얻을 수 있었으며, 이보다 지각될수록 배출 가스 온도는 감소하는 경향을 확인하였다.

(3) 본 실험 결과에서 후분사 변화에 의한 전형적인 PM-NOx trade-off를 확인하였다.

(4) 후분사를 통한 배출 가스 온도 상승의 효과가 극대화 되는 영역의 경우, late combustion 영역에서 실린더 내 압력 상승 및 급격한 열 방출률의 증가를 확인하였다.

참고 문헌

- 1) 장동훈 외, "직접분사 단기통 디젤 엔진에서의 후분사 변화가 배출가스 온도 변화에 미치는 영향에 대한 기초 연구", 한국 자동차 공학회 춘계 학술 대회 논문집, pp316~321, 2003년
- 2) 국상훈 외, "커먼레일 분사 시스템을 장착한 직접 분사식 단기통 디젤 가시화 엔진의 연소 특성", 한국 자동차 공학회 춘계 학술 대회 논문집, pp367~368, 2002년
- 3) <http://www.dieselnet.com>, "common rail fuel injection", 2000
- 4) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals"
- 5) H. Klein et al., "Hydrocarbon DeNOx Catalysis System Development for Diesel Passenger Cars and Trucks,"SAE 1999-02-0109, 1999
- 6) Francisco Payri et al., "Influence of the Post-Injection Pattern on Performance, Soot and NOx Emission in a HD Diesel Engine,"SAE 2002-01-0502, 2002