

매연여과장치 재생을 위한 커먼레일 디젤엔진의 연소 최적화에 관한 연구

강 중 훈¹⁾ · 김 만 영^{*2)} · 윤 금 중¹⁾

현대자동차 승용디젤엔진시험팀¹⁾ · 전북대학교 기계항공시스템공학부²⁾

A Study on the Combustion Optimization of a Common Rail Direct Injection Diesel Engine for Regeneration of the Diesel Particulate Filter

Jung Whun Kang¹⁾ · Man Young Kim^{*2)} · Gum Joong Youn¹⁾

¹⁾Passenger Car Diesel Engine Test Team, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

²⁾School of Mechanical & Aerospace System Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea
(Received 11 January 2005 / Accepted 23 May 2005)

Abstract : Thermal regeneration means burning-off and cleaning-up the particulate matters piled up in DPF(diesel particulate filter), and it requires both high temperature (550~600°C) and appropriate concentration of oxygen at DPF entrance. However, it is not easy to satisfy such conditions because of the low temperature window of the HSDI(high speed direct injection) diesel engine(approximately 200~350°C at cycle). Therefore, this study is focused on the method to raise temperature using the trade-off relation between temperature, oxygen concentration, and the influence of many parameters of common rail injection system including post injection. After performing an optimal mapping of the common rail parameters for regeneration mode, the actual cleaning process during regeneration mode is investigated and evaluated the availability of the regeneration mode mapping through regenerating soot trapped in the DPF.

Key words : DPF(Diesel Particulate Filter, 매연여과장치), Regeneration(재생), Diesel engine(디젤엔진), Post injection(후분사)

1. 서 론

온실가스 저감 및 연비 향상, 그리고 출력과 내구성이 우수한 디젤엔진에 대한 수요가 급증함에 따라 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질(Particulate Matters, PM)과 질소산화물(NOx)의 배출규제가 점점 강화되고 있다. 이에 따라 자동차의 배기규제 강화에 대응하기 위한 엔진연소 개선, 제어기술의 향상 및 배출가스 후처리시스템에 대한 활발한 연구 개발이 이루어지고 있다.¹⁻³⁾ 특히, 최근들어 레일압 1600bar의 커먼레일 연료분사 시스템 및 흡배기 관

련 신기술의 적용으로 디젤엔진의 입자상물질 배출은 기존엔진 대비 대폭 저감되었으나, 보다 강화되는 배기규제 대응을 위해서는 매연여과 및 처리장치인 DPF(Diesel Particulate Filter)의 개발이 절실히 요구되고 있다. 특히, DPF 개발의 가장 중요한 요소는 DPF의 입자상물질 포집한도에 도달한 후 이를 적정시기에 태우는 재생(regeneration)에 대한 기술로서,^{4,5)} 본 연구에서는 DPF 내에서 입자상물질을 태우기 위한 재생조건, 즉, 550~600°C에 달하는 DPF 입구온도 및 DPF 입구의 산소농도(5~8%) 조건을 달성하기 위한 커먼레일 디젤엔진의 연소 최적화 기술을 고찰하고자 한다. 하지만 싸이클 시험시

*To whom correspondence should be addressed.
manykim@chonbuk.ac.kr

HSDI 디젤엔진의 배기가스 온도가 200~350°C 수준인 점을 감안하면 이러한 재생조건 달성은 매우 어려운 과제로서, 더욱이 엔진 각 운전영역 별로 배기가스의 온도 및 산소농도의 특성이 상이하기 때문에 엔진 운전영역별로 최적화된 서로 다른 전략을 가져야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는, (1) 재생조건 달성을 위한 커먼레일 분사계의 인자별 영향도 파악 및 이를 토대로 한 최적화 매핑을 수행하며, (2) 커먼레일 HSDI 디젤엔진에서 엔진영역별로 재생조건 달성 가능여부를 밝히고, (3) 확립된 매핑 기술을 적용하여 실제로 DPF 내부의 입자상물질을 연소시킴으로써 재생 메카니즘을 고찰하고자 한다. 최종적으로, 이러한 재생 메카니즘 고찰을 통하여 물리적으로 재생이 가능한 시작온도를 파악함으로써 불필요한 온도상승을 억제하여 연비 및 배기가스 생성을 최적화하고, 재생 메카니즘 중 어떤 과정에서 DPF 담체 내부의 내구성 문제를 일으키는 지 밝히는 것을 목표로 한다.

2. 시험조건 및 예비시험

2.1 시험조건

Fig. 1은 본 시험에 적용된 엔진 및 DPF가 장착된 개략도를 보여주고 있다. 본 시험에 적용된 엔진은 현대자동차에서 개발한 D2.0-VGT 디젤엔진으로서, 최고분사압이 1,350bar인 커먼레일 연료분사 시스템, VGT, 그리고 EGR이 장착되어 있다. 한편, DPF는 필터에 촉매를 코팅함으로써 PM의 재생온도를 낮출 뿐만 아니라 일정온도 이상에서는 자연

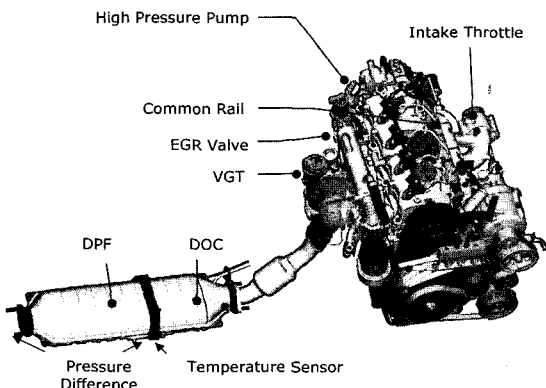


Fig. 1 Schematic of the test engine and DPF

적인 재생이 가능하다. 본 시스템은 차량의 하부, 즉 기존의 UCC 위치에 장착하여 엔진으로부터 방출된 PM의 포집 및 재생을 반복적으로 수행하게 된다. 또한 본 시스템은 배기가스의 저감 및 재생시 필요한 배기온도 상승을 위한 디젤산화촉매(DOC)와 필터의 재생 시기 및 지속시간 등을 판단하는 차압센서 및 온도센서 등으로 구성되어 있다.

2.2 DPF 재생조건

PM의 산화율은 CO, HC 등과 같은 일반 배기가스의 산화율보다 훨씬 낮기 때문에 체류시간이 매우 짧은 탄소입자가 유동형 촉매 내에서 산화하지 못한다. 따라서 PM의 원활한 산화를 위해서는 물리적으로 PM 입자를 포집하여 체류시간을 길게 하는 디젤매연필터(DPF)/디젤트랩이 필요하다. 한편, DPF의 열적 재생률은 내부에 포집된 PM 산화율의 제한을 받을 뿐만 아니라 PM의 산화율은 반응온도(DPF 입구온도)와 포집된 PM 양, 그리고 DPF 담체의 촉매화 정도에 영향을 받는다.

Fig. 2는 DPF 입구온도의 변화에 따른 입자상물질의 산화율(질량기준)을 나타낸 그림으로서, 산화율(재생율)을 높이기 위해서는 약 600°C에 가까운 높은 온도가 요구됨을 보이고 있다.⁶⁾ 한편, 이러한 반응온도 뿐 아니라 PM의 연소를 위해서는 적정량의 산소가 요구되며, 본 연구에서의 목표 산소농도는 다양한 조건에서 5~8%로 설정하였다.

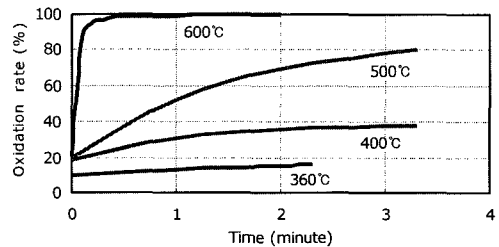


Fig. 2 Oxidation rate of the soot

2.3 후분사 및 배기온도 상승 메카니즘

DOC 내 촉매에 의한 THC 산화반응을 위하여 엔진 후분사가 요구되며, Fig. 3은 후분사 시 인젝터에 가해지는 구동전류와 실제 분사율을 재측한 것으로서, 구동전류 인가로부터 분사시작까지 약 3~4ms의 지연이 존재함을 나타낸다.

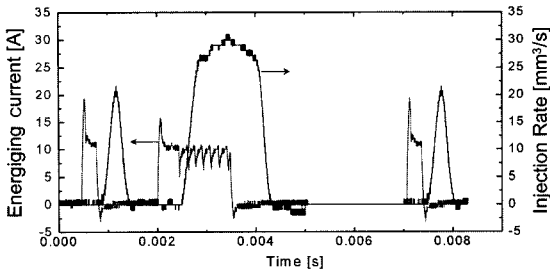


Fig. 3 Diagram of the post injection signal

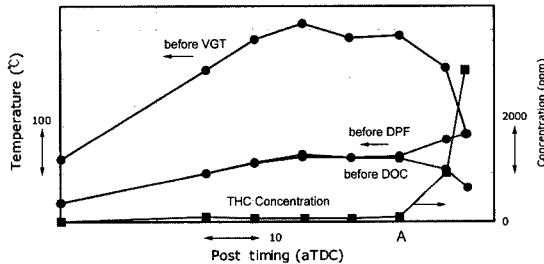


Fig. 4 Effect of post injection on the exhaust gas conditions

Fig. 4는 동일 후분사량 조건일 때 후분사시기 지연에 따른 엔진 배기조건을 나타낸 그림이다. aTDC A°까지는 후분사된 연료가 연소실 내부에서 연소되어 터빈입구 및 DOC 입구온도가 높게 유지되지만, DOC까지 공급되는 THC 양이 적기 때문에 DOC 내부의 산화 발열반응을 통한 DPF 입구온도의 상승효과를 기대하기 어렵다. 반면, aTDC A° 이후 분사된 연료는 연소실 내 주분사의 영향을 덜 받기 때문에 DOC까지 THC 형태로 원활히 공급되어 DOC 내의 산화반응에 이용될 수 있다. DOC 내 산화반응에 의한 온도상승은 촉매의 특성상 연소실에서의 연소에 의한 것보다 그 크기가 매우 크기 때문에 목표로 하는 온도달성을 위해서는 이러한 DOC 발열반응에 의지해야 함을 알 수 있다.

한편, 본 시험에 사용된 커먼레일 연료분사계 및 VGT가 장착된 2.0L급 승용디젤엔진의 전체 운전영역에 대한 배기온도 및 DPF 입구의 산소농도는 일반적으로 목표온도인 550~600°C보다 훨씬 낮은 뿐만 아니라, 중저속 저부하 영역에서의 산소농도는 목표 산소농도 5% 수준에 모자라기 때문에 이러한 재생조건 달성을 위한 다양한 시험을 수행하였다.

또한, 차량의 주행특성상 고속 저부하는 주요운

전영역이 아니기는 하지만, 내리막길 등에서 운행될 경우 과도한 산소농도로 인하여 원하지 않는 급격재생이 발생할 우려가 있다. 통상 과도한 급격재생이란 DPF 내부의 PM 퇴적량, 온도, 그리고 산소농도 중 하나 이상의 인자가 과다하여 포집된 PM이 매우 짧은 시간 내에 연소되는 현상을 뜻하며, DPF 내구한계 이상의 과도 온도상승을 일으켜 담체 및 내부 귀금속의 파손을 가져올 수 있다. 따라서 이러한 고속 저부하 영역에서는 과도한 산소농도가 급격재생 요인으로 작용할 수 있으므로 적절한 제한이 필요하다. 아래에서는 이러한 재생조건 달성을 위한 커먼레일 디젤엔진의 연소특성 및 그 효과를 고찰한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 커먼레일 파라미터별 영향도

VGT장착 커먼레일 디젤엔진의 경우 조정가능한 파라미터로는 주분사시기, 후분사 시기 및 양, 파일럿 분사시기 및 양, 레일 압력, 부스트 압력, 흡기 스톱를 개도, 그리고 EGR 을 등이 있으나, 본 연구에서 파일럿 분사는 DPF 재생조건에 미치는 영향이 미미한 것으로 자료조사되어 생략하였다. 즉, 상기의 6개 파라미터가 DPF 입구온도 및 산소농도에 미치는 영향도를 파악하여 영향도가 적은 파라미터는 배제하고, 영향도가 큰 파라미터를 최적화 맵핑시 우선 활용하는 전략으로 접근하였다.

Fig. 5는 1500rpm, bmep 2bar에서 주분사시기 지연이 배기조건에 미치는 영향을 나타낸 것으로서, 분사시기 지연에 따라 온도상승 및 산소농도의 수준이 적절한 반면 연비의 악화를 초래하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 주분사시기 지연을 통하여 목표로 하는 것은 DOC의 산화반응 온도인 LOT (light-off temperature)의 달성이며, 이는 후분사 실시 전 반드시 만족되어야 할 필수조건이다.

또한 Fig. 6은 동일 후분사량 조건일 때 후분사시기 변경에 의한 효과를 나타낸 것으로서, Opacity 값이 aTDC A°이후 적어지는 것은 연소실에서 주분사에 의한 고온환경에서 THC가 소모되기 때문이다. 이는 DOC 입구에서 측정된 산소농도의 감소로서 확인할 수 있다. 그러나 aTDC B°이후 DOC 입구에

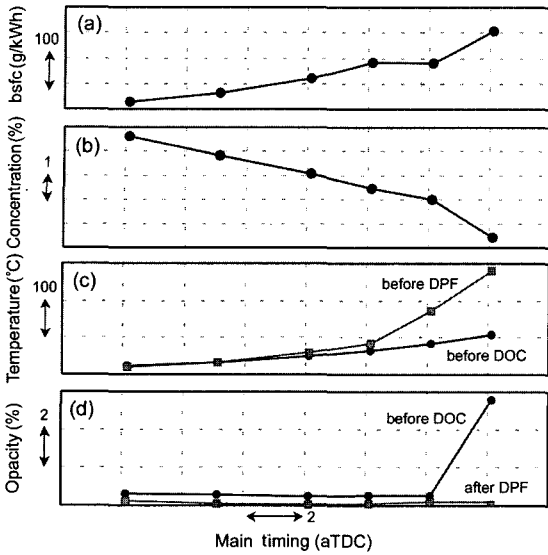


Fig. 5 Effect of main timing on the exhaust conditions : (a) fuel consumption, (b) O₂ concentration, (c) temperature, and (d) opacity. (bmep 2bar@1,500rpm)

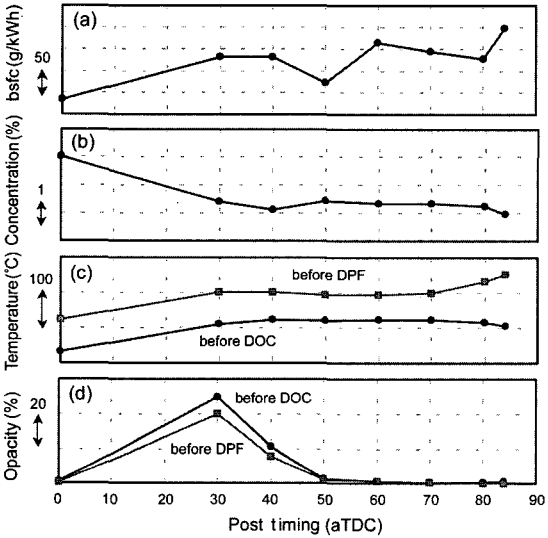


Fig. 6 Effect of post injection timing on the exhaust conditions : (a) fuel consumption, (b) O₂ concentration, (c) temperature, and (d) opacity. (bmep 2bar @1,500rpm)

서의 온도가 감소하는데 이는 주분사에 의한 연소 반응에 후분사된 연료의 소모가 적어짐을 뜻하는 것으로서, DOC로 THC가 직접 공급되는 것을 의미한다. 이 때, 동일한 후분사량임에도 불구하고 연비가 악화되는 것은 분사시기 지연이 이루어질수록

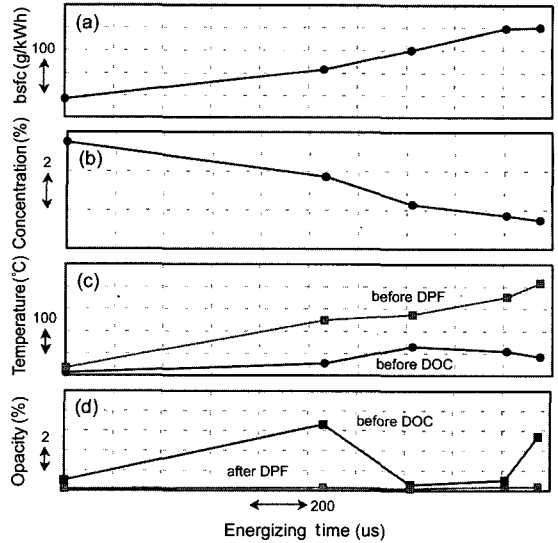


Fig. 7 Effect of post injection quantity on the exhaust conditions : (a) fuel consumption, (b) O₂ concentration, (c) temperature, and (d) opacity. (bmep 2bar @1,500rpm)

후분사량 증에서 토크로 이용되는 연료량이 감소하기 때문이다. Fig. 7은 Fig. 6에서 얻어진 최적의 후분사 시기인 aTDC C°에서 분사량(즉, energizing time)을 증가시키며 목표온도 및 목표 산소농도에 도달하는 과정을 나타낸 것이다. 한편, Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 재생 목표온도 달성을 위하여 후분사를 이용한 DOC의 산화반응을 유도하는 것은 엔진회전수가 고속이 되거나 엔진의 부하가 증대되면 그 효과가 감소하는 것이 확인되었다. 이는 회전수 및 부하별로 후분사시기의 최적점이 존재함을 의미한다.

Fig. 8은 EGR율의 증가, 즉, 각 실린더 당 흡입되는 공기량을 감소시킴에 따른 효과를 나타낸 것이다. EGR율의 증가와 주분사시기 지연에 따른 배기 온도의 상승효과는 서로 비슷하다고 볼 수 있으나, EGR은 공기량의 직접 제어를 통한 산소농도의 큰 감소를 유발하기 때문에 재생조건 달성 매핑 시 반드시 EGR을 단락시켜야 함을 알 수 있다.

한편, 기타 파라미터의 시험결과를 보면 흡기 흐름률 개도조정은 저속 저부하에서 어느정도의 온도 상승효과가 있지만, 고속 및 부하상승에 따라 엔진 정지의 위험이 있고, 또한, 레일 압력변경은 그 효과가 매우 작은 것으로 확인되었다. 이와 함께, 고속저

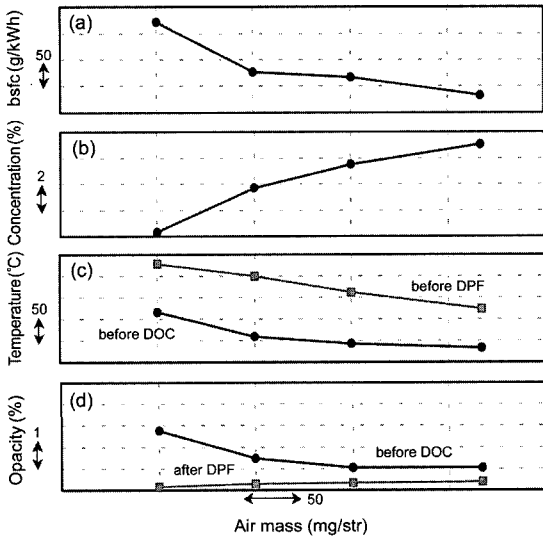


Fig. 8 Effect of EGR on the exhaust conditions : (a) fuel consumption, (b) O₂ concentration, (c) temperature, and (d) opacity. (bmep 2bar@1,500rpm)

부하에서 부스트 압력은 고속 저부하(예를 들어, 3500rpm, bmep 2bar)에서 대기압 수준으로 유지하는 경우 목표 온도 달성 및 과도한 산소농도의 제한에 매우 효과적이지만, EGR율을 증가시키는 방법은 산소농도 제한에는 기여하지만 온도조건 달성에는 크게 부족함이 확인되었다. 따라서, 주분사시기 지연, 후분사시기 및 후분사량 변경, 그리고 영역별로 일부 구간에서 부스트 압력변경이 재생조건 달성에 영향도가 큰 매개변수라 할 수 있다.

3.2 재생조건 달성방안

전체 엔진운전영역에서 재생조건을 달성하기 위해서는 영역별로 적용기술 및 정도가 조금씩 차이가 있긴 하지만 주로 적용되는 것은 DOC의 산화 발열반응을 활용하는 것이다. 이를 위하여, 우선 주분사시기 지연을 통하여 DOC 활성화조건을 충족시킨 후, 엔진 후분사를 이용하여 DPF 재생에 사용될 연료인 THC를 DOC로 공급하는 방법을 사용하였다. 단, 후분사를 실시하기 전에 EGR 단락을 통하여 충분한 산소농도 확보가 선행되어야 한다. 여기에서, DOC 활성화조건이라 함은 DOC의 반응온도 및 적정 산소농도의 확보를 뜻하며, 이 조건을 만족시키지 않은 채 후분사를 실시하면 후분사된 연료가 액상

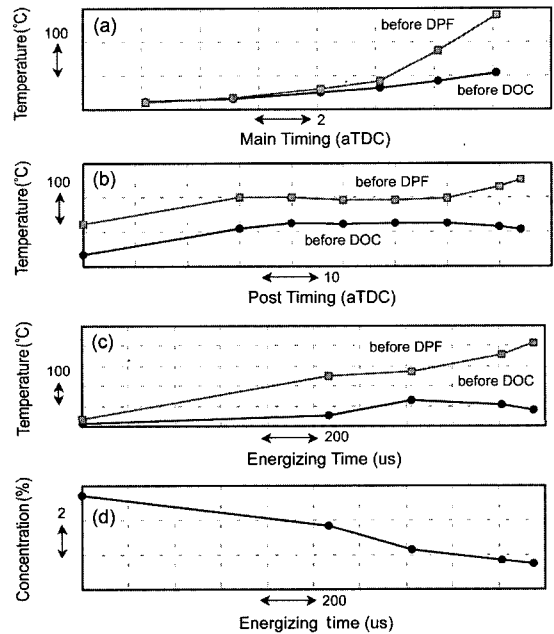


Fig. 9 Summary of the regeneration strategy. Effects of (a) main timing, (b) post injection timing, and (c) post injection timing. (bmep 2bar@1,500rpm)

으로 DPF의 입구를 막아 심각한 유동장애 및 엔진 정지를 야기시킬 수 있다. 한편, Fig. 9(c)와 (d)에서 알 수 있듯이, DPF 입구의 산소농도는 DPF 입구온도와 반대경향을 갖는다.

3.3 최적화 매핑(주/후분사시기 최적화)

엔진회전수가 증대할 경우 공간속도가 커지기 때문에 촉매 내 반응시간이 짧을 뿐만 아니라 부하가 증대할 경우 주분사에 의한 연소환경에 후분사연료가 소모되는 현상이 커지기 때문에 엔진후분사에 의한 DOC 산화반응은 그 역할이 감소한다.

Fig. 10은 1500rpm, 2bar에서 주분사시기 지연(즉, BOI1→BOI3)에 따라 후분사시기 최적점이 계속 각각됨을 보이고 있다. 여기에서, 후분사시기의 최적점이란, 동일 후분사량 대비 DOC 온도와 DPF 온도와의 차이가 최대인 점을 말한다. 한편, bmep 8bar 이상의 중고부하에서는 주분사시기 지연에 따라 후분사시기의 최적점이 나타나지 않고 계속 온도가 올라가는 경향을 보인다. 부하가 커질수록 증가하는 주분사량으로 인하여 연소온도가 높아지기 때문에

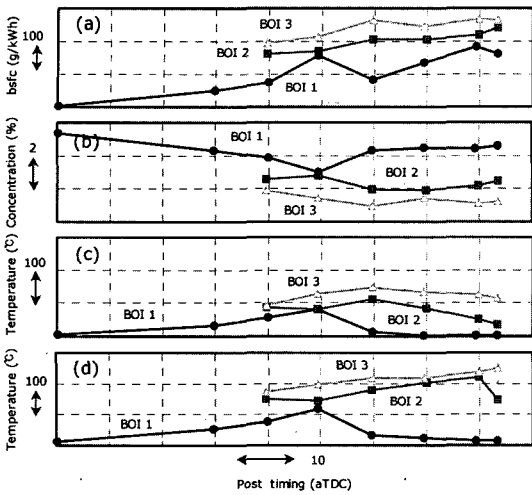


Fig. 10 Optimization of the main and post injection timing : (a) fuel consumption, (b) O₂ concentration, (c) DOC inlet temperature, and (d) DPF inlet temperature. (bmep 2bar@1,500rpm)

팽창행정 에 미치는 온도영향이 커지므로, 연소실에서 소모되는 후분사 연료량의 증가를 피하기 위하여 분사시기를 더욱 지각시킬 필요가 있다. 즉, 두 분사시기 간에는 적정 간격이 요구되며 부하가 커질수록 그 간격이 커져야 함을 의미한다.

또한, 부하가 커지는 경우 저부하와는 달리 후분

사된 연료가 일정 수준으로 연소실 내에서 소모되는 것을 피할 수는 없는 문제가 있는데, 이 경우 후분사 연료는 일부가 DOC 내에서 산화 발열반응에 이용되고 또 일부는 연소실 내 후연소에 의하여 발생하는 온도상승 효과를 동시에 활용해야 한다.

3.4 최종 매핑 결과 및 재생과정 고찰

상기 커먼레일 파라미터 별 영향도 결과를 토대로 최적화 연구를 수행하여 엔진전체영역에서 중저속 전부하의 산소부족 구간을 제외한 전체 영역에서 재생조건에 도달하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는, 대부분의 디젤엔진이 비록 온도는 목표에 미달하지만, DOC내에서 두 인자간의 상반관계를 활용하여 잉여 산소를 연소를 통하여 온도로 전환할 수 있기 때문이다. 한편, 중저속 전부하의 경우는 기준점에서의 두 조건이 동시에 만족되지 못하기 때문에, 즉, 중저속 전부하 영역은 온도조건만 달성이 가능할 뿐, 산소농도가 극히 낮기 때문에 원활한 PM의 재생은 어려울 것으로 판단된다.

Fig. 11은 DPF 에 PM을 포집시킨 후, 본 연구에서 개발된 맵핑전략을 이용하여 DPF 내 실제 재생이 일어나는 과정을 고찰한 것이다. 재생시간을 결정 짓는 세가지의 주요인자 즉, PM의 퇴적량, DPF 입

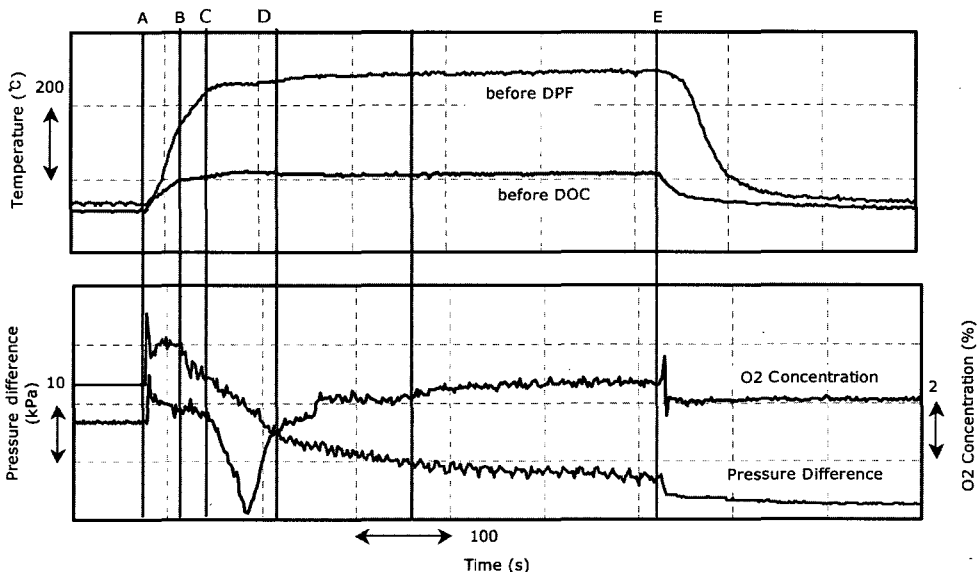


Fig. 11 Transient behavior of the filter regeneration

구온도, 그리고 산소농도를 충분히 만족시킨 결과 재생과정이 아래의 4단계로 구성됨을 확인할 수 있다. 즉, 일반 주행모드에서 재생모드로 전환 후 재생 조건에 도달하는 구간(AB), 재생이 시작되어 DPF 전후단의 압력이 줄어들기 시작하는 초기 재생구간(BC), 급격하게 내부의 PM이 태워지는 급격재생구간(CD), 그리고 마지막으로 잔여 PM이 서서히 연소되면서 차압의 기울기가 완만해지는 후기 재생구간(DE)으로 구분할 수 있다. 이 중 집중적으로 제어가 되어야 할 구간은 DPF 담체내부의 연소온도가 1200°C 이상으로 올라가는 3단계 급격재생구간으로, 본 연구에 적용된 총 재생기간 중에서 급격재생구간은 약 20%를 차지하고 있다. 실제 양산적용 시 총 연소시간 제어보다는 급격재생구간의 시간 제어가 DPF 내부 담체 및 귀금속의 내구성 유지에 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

4. 결론

DPF 내 쌓인 입자상불질을 재생시키기 위하여 커먼레일 디젤엔진에서 제공해야 하는 재생모드 맵핑 기술 및 연소최적화 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 커먼레일 연료분사계의 여러 파라미터들이 재생 조건에 미치는 각각의 영향도를 평가하여 주요 인자들을 도출하였다.
- 2) 주요인자들간의 관계를 파악하는 시험을 수행하여 맵핑시 인자간 고려해야 할 연결고리를 찾고, 엔진 회전수 및 부하별로 재생조건 도달 방안을 도출하였고 또한 각 인자들을 결합하여 최적화 맵핑기술을 수립하였다.
- 3) 특히 본 연구에서는 bmep 2bar@2,000rpm 조건에서의 다양한 실험결과를 분석하여 특정 조건에서의 검토사항을 고찰하였다.

- 4) 개발된 맵핑전략을 이용하여 실제 DPF 재생을 수행하였고, 재생연소가 4단계로 구성되는 점과 초기재생온도 및 DPF 내구성을 위해 제어해야 할 중요구간임을 도출하였다.

후 기

본 연구는 현대자동차 및 전북대학교 기계자동차 산업기술교육혁신사업단(<http://numate.chonbuk.ac.kr>)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) O. Salvat, P. Marez and G. Belot, "Passenger Car Serial Application of a particulate Filter System On a Common Rail Direct Injection Diesel Engine," SAE 2000-01-0473, 2000.
- 2) M. Bouchez and J. B. Dementhon, "Strategies for the Control of Particulate Trap Regeneration," SAE 2000-01-0472, 2000.
- 3) K. Nakatani, S. Hirota, S. Takeshima, K. Itoh, T. Tanaka and K. Dohmae, "Simultaneous PM and NOx Reduction System for Diesel Engine," SAE 2002-01-0957, 2002.
- 4) J. G. Hawley, D. G. Tilley, J. Hall, A. Cox, S. T. Kolaczowski and R. W. Horrocks, "PM Thermal Regeneration - The Potential for Catalytic Combustion," SAE 2002-01-0434, 2002.
- 5) R. Allansson, P. G. Blakeman, B. J. Cooper, H. Hess, P. J. Silcock and A. P. Walker, "Optimizing the Low Temperature Performance and Regeneration Efficiency of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter (CR-DPF) System," SAE 2002-01-0428, 2002.
- 6) W. A. Majewski, "Diesel Filter Regeneration," www.dieselnet.com, 2004.