

HSDI 디젤 엔진 연비 저감 개발에 대한 연구

전 제 록* · 유 준 · 윤 금 중

현대자동차

Study of HSDI Diesel Engine Development for Low Fuel Consumption

Jerok Chun* · Jun Yu · Kumjung Yoon

Department of Passenger Car Diesel Engine, Research & Development Division for Hyundai Motor Company and Kia Motors Corporation, 772-1 Jangduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 24 June 2005 / Accepted 15 October 2005)

Abstract : Modification of injector , oil ring tension reduction and oil pump rotor re-matching with optimization of relevant engine control parameters could drive fuel consumption reduction of HSDI diesel engine. A 5 holes injector was replaced with a 6 holes with smaller nozzle hole diameter and 1.5 k factor, and evaluated in a view of fuel economy and emission trade-offs. With introducing smaller nozzle hole diameter injector, PM(Particulate Matter) was drastically decreased for low engine load and low engine rpm. Modification of oil pump and oil ring was to reduce mechanical friction and be proved to better fuel economy. Optimization of engine operating conditions was a great help for the low fuel consumption. Influence of the engine operating parameters including pilot quantity, pilot interval, air mass and main injection timing on fuel economy, smoke and NOx has been evaluated with 14 points extracted from NEDC(New European Driving Cycle) cycle. The fuel consumption was proved to 7% improvement on an engine bench and 3.7% with a vehicle.

Key word : Fuel consumption(연비), CO₂(이산화탄소), HSDI(고속직접분사식디젤엔진), NEDC(유럽 에미션 사이클)

1. 서론

고속직접분사식 디젤 엔진(이하 HSDI 디젤 엔진이라 표기함)은 높은 열효율과 낮은 이산화탄소 배출 특성 때문에 승용차 및 SUV(Sport Utility Vehicles) 차량에의 적용이 점차로 증대되고 있다. 특히 완성차 메이커에서는 교토 의정서 협약에 따라 2008년까지 판매 차량의 평균 이산화탄소배출량을 40g/km까지 자율적으로 줄이기 위하여 HSDI 디젤 엔진에 대한 연구를 집중하고 있다. HSDI 디젤 엔진은 기존의 기계식 연료 분사 펌프 적용 엔진과 다르

게 연료 분사 압력 및 분사 시기, 파일럿 분사량 등의 엔진 운전 변수를 엔진 회전수와 무관하게 제어할 수 있는 커먼레일 시스템이 적용되어 환경 규제 대응 및 연비 향상에 많은 도움을 주고 있다. 본 연구는 커먼레일이 장착된 양산 HSDI 디젤 엔진의 연비 향상에 미치는 인젝터, 오일펌프 및 오일링 개선과 같은 하드웨어 변경 효과와 흡입 공기량, 연료 분사 압력, 파일럿량, 파일럿 간격(파일럿 분사시기와 주 분사시기 사이의 간격) 및 주 분사 시기와 같은 엔진 운전 조건 변경에 따른 연소 개선 효과를 엔진 조건에서 조사하고 그 결과와 실제 차량에서의 연관성을 파악하는 데 목적이 있다.

*To whom correspondence should be addressed.
jerokc@hyundai-motor.com

2. 본 론

2.1 주요 엔진 제원

본 연구에서 사용한 엔진은 현재 유럽 지역 디젤 CO₂ 감축 대응의 일환으로 양산 중인 3기통 1.5L HSDI 디젤 엔진을 기본으로 한 것으로 상세 엔진의 제원 및 외형도를 Table 1, Table 2, Fig. 1에 각각 나타내었다.

인젝터는 K factor가 1.5인 6홀인젝터를 선정하여 전부하 엔진 출력을 기존 5홀 인젝터에 의한 출력을 유지하면서 연료 미립화 촉진에 의한 연소성 개선을 유도하였다.¹⁾ 또한, 배기가스 및 스모크는 Horiba MEXA 9100HEGR과 AVL 415 각각을 이용하여 측정하였다.

Table 1 Engine specification

항목	사양
배기량	3 Cylinder, 1493 cc
Bore × Stroke	83 × 92 mm
최대출력(kW/PS)	60 / 82 @ 4000rpm
최대토크(Nm)	191 @ 2000 rpm
TYPE	DI - TCI,
Turbocharger	Waste gated T/C
Valve System	4 valve/cylinder

Table 2 Injector specification

항목	5홀인젝터	6홀인젝터
연료유량 (cc/30sec)	400	440
분공경(mm)	0.168	0.158
분공각(도)	150	150
K-factor	0	1.5

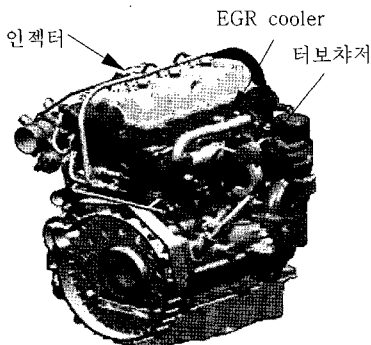


Fig. 1 Schematic of diesel engine

2.2 시험 결과

본 연구는 첫 번째로 엔진 단체에서 연비 개선을 위한 파라메타를 선정하고 효과를 파악한 후 그 결과를 차량에 적용하여 차량과 엔진 단체의 상관성을 파악하였다. 엔진 단체에서의 연비 개선은 연소 특성 개선에 의한 연비 개선과 기계적 마찰 개선에 의한 연소 개선으로 분리하여 진행하였다.

2.2.1 인젝터 특성 변화에 의한 연비 개선

연소성 개선에 큰 기여도를 갖는 인자 중 하나인 인젝터에 대한 기초 평가는 Table 3에 나타난 엔진 운전 조건에서 NO_x, smoke, 연비의 항목으로 평가하였다.

Table 3 Engine operating points

Mode no.	Engine speed [rpm]	BMEP [bar]
1	1500	4
2	2000	2
3	2000	6
4	2500	8

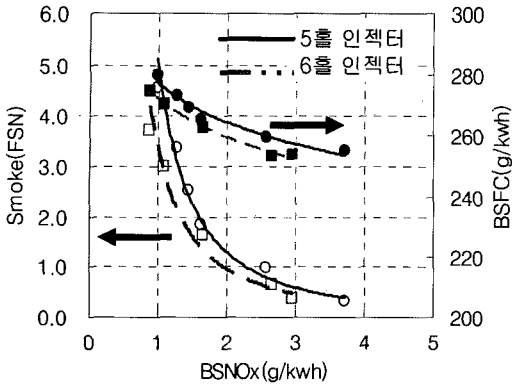
Fig. 2(a)는 1500 rpm, BMEP 4 bar 조건에서 6홀인젝터와 5홀인젝터 적용이 연소 특성에 미치는 영향을 나타내기 위한 것으로, 6홀인젝터를 적용하면 동일 NO_x에 대하여 스모크가 적게 배출되고 연비가 낮아지는 것을 알 수 있다. 하지만, Fig. 2(b), (c)에서와 같이 엔진 회전수와 부하를 증가시킬수록 연료 미립화에 의한 연소 개선 효과는 낮아지는 것을 알 수 있다.

2.2.2 체적효율 변화에 의한 연비 개선

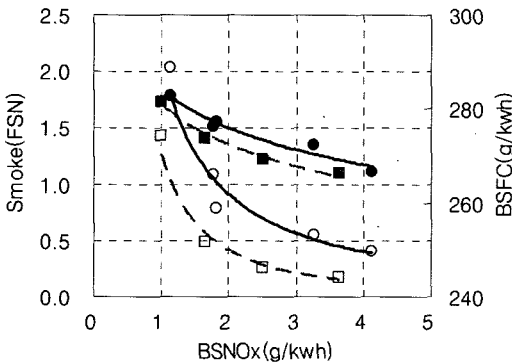
Fig. 3은 흡기 밸브 닫힘 시기와 연비와의 상관성을 나타낸 것이다. 흡기 밸브 닫힘 시기를 43도에서 10도와 20도로 각각 지각시키더라도 1500rpm, BMEP 4 bar 조건에서 연비 향상에 미치는 영향은 미미하게 나타났다. 이는 부분 부하 조건에서 체적 효율 변화는 연비 향상에 크게 기여하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

2.2.3 마찰손실 저감에 의한 연비 개선

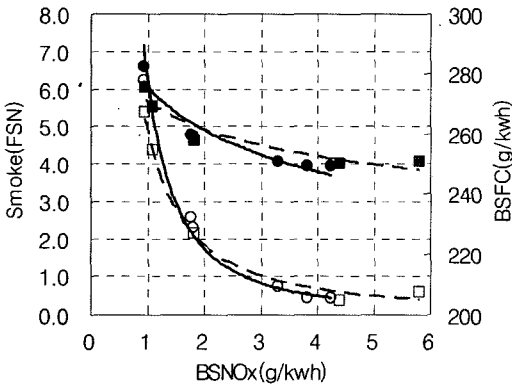
기계적 마찰 손실 저감을 위하여 엔진의 기계적 마찰력 분석을 통하여 오일 링 및 오일 펌프를 마찰력 개선 대상 부품으로 선정하였다. 오일 펌프의 구



(a) 1500 rpm, 4 bar



(b) 2000 rpm, 6 bar



(c) 2500 rpm, 8 bar

Fig. 2 Effect of injector characteristics on fuel consumption and engine out emission

동 토크는 오일펌프 토출 유량 및 토출 압력 최적화를 통하여 저감시켰고, 오일 링의 장력을 최적화하였다. 이와 같은 오일펌프 및 오일링 마찰 개선을 통하여 FMEP를 Fig. 4에 나타난 바와 같이 기존 사양 대비 0.03-0.1bar (개선율 1.6-2.7%) 낮추었고 이는

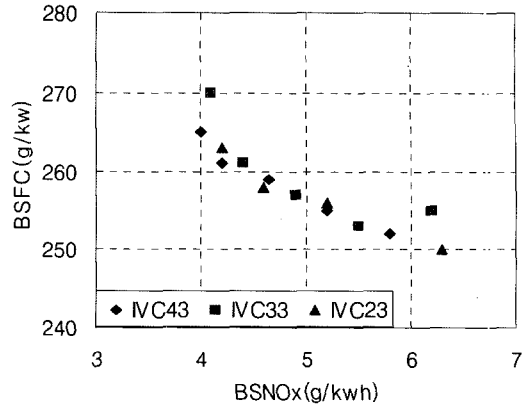


Fig. 3 Effect of exhaust valve open timing

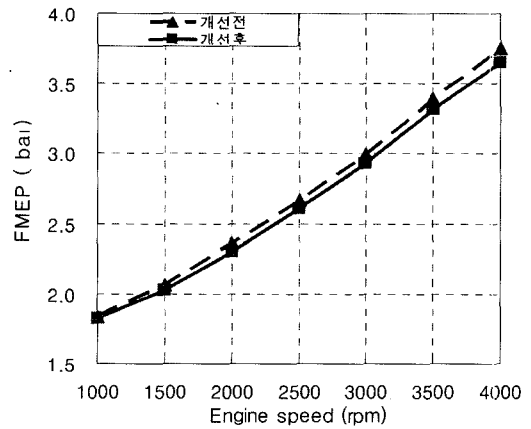


Fig. 4 Effect of friction improvement

NEDC cycle의 부분 부하 영역에서 연비 개선 효과로 이어질 것으로 생각된다.

2.2.4 차량 연비와 엔진 연비와의 상관성

차량 연비를 최적화하기 위해서는 연비 측면에서 최적의 하드웨어로 엔진을 구성하는 것도 중요하지만, 하드웨어를 변경하지 않으면서 연비 개선에 기여도가 높은 엔진 운전 조건을 선정하고 개선 정도를 예측 분석하여 개선 기여도 가능성이 높은 운전 조건에서 엔진 공기량, 연료 분사압력 및 분사량, 파일럿 연료 분사량 및 파일럿 간격 및 연료 분사 시기와 같은 엔진 운전 파라미터들을 최적화하는 것도 중요하다. 따라서 본 연구에서는 차량에서의 연비와 배출 배기가스 측정 시험 모드 중 많이 사용되는 시내운전 모드와 고속 운전 모드로 이루어져 있는 NEDC (New European Driving Cycle)²⁾상의 차량 운

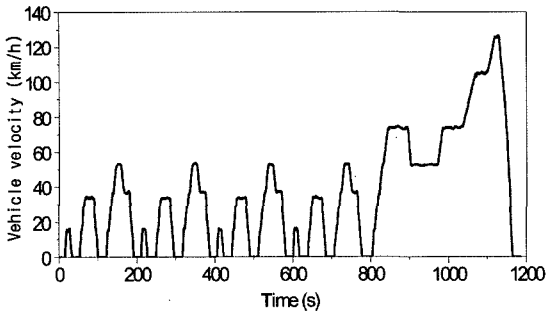


Fig. 5 Typical NEDC

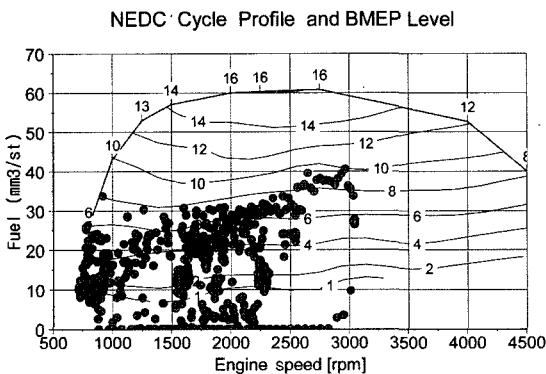


Fig. 6 Correlation between NEDC and engine load

전 궤적을 분석하여 이로부터 엔진 시험시 대표될 수 있는 14 운전 모드를 선정하고 이를 기준으로 연비 개선 가능성을 평가하였다. Fig. 5는 시간에 따른 차속 변화로 이루어져 있는 상용 차량의 대표적인 NEDC 운전 궤적을 나타내고, Fig. 6은 엔진 회전수와 BMEP로 구성되는 엔진 운전영역과 NEDC 궤적과의 관계를 나타낸다. 일반적으로 14 모드점 설정은 차량에서의 연비 및 배기가스 측정 결과와 엔진 대상에서의 시험된 결과 값과의 상관관계를 유추하여, 엔진의 하드웨어의 변경이나 매핑 파라메타 변경에 의한 실제 차량에서의 에미션 값의 변화량 및 연비 개선량을 엔진 대상에서 선 예측하기 위한 것이다.

본 연구에서 사용된 시험 모드는 차량이 NEDC 궤적에 따라 운전되면서 경과되는 엔진 회전수와 분사 연료량의 향으로, 엔진 운전이 경과되는 시간을 적산하여 가장 많이 시간이 경과된 엔진 운전(엔진 회전수, 연료 분사량) 구간을 기준으로 14 모드 점을 선정하였고 이는 전체 NEDC상 차량 운전 궤적의 57%를 대표한다. 각 14 모드 포인트의 weigh-

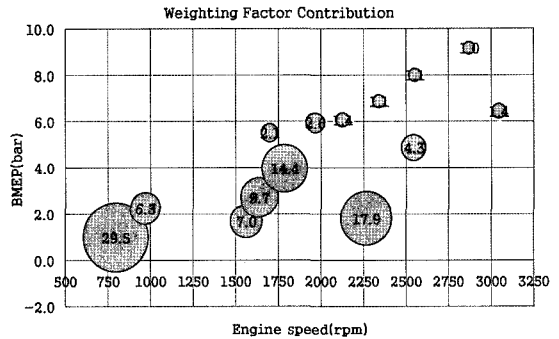


Fig. 7 Weighting factors for the fuel consumption improvement

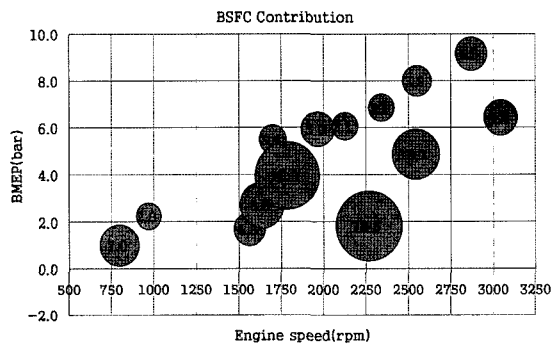


Fig. 8 Fuel consumption contribution and 14 mode points

ting factor는 각 모드 점에서 경과된 적산 시간을 전체 NEDC 운전 시간으로 나눈 값으로 정의하였다. Fig. 7은 본 연구에서 사용한 운전 영역에서의 14 모드 점과 weighting factor이고 Fig. 8은 각 포인트에서 연비 개선 기여도이다.

2.2.5 모드 점에서 엔진 운전 조건 최적화

Fig. 9 ~ 12는 2.2.4항에서 설명한 14 모드 점 중 모드 9 조건 (1540rpm, BMEP 3.9 bar)에서 6홀 인젝터와 마찰 손실 저감 사양인 오일펌프 및 오일 링을 모두 적용하여 파일럿 분사 간격, 공기량, 연료 분사압력, 파일럿 분사량 및 주 분사시기 변화가 연비, CO, NOx, smoke에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

그림에서 보이는 바와 같이 파일럿 간격을 줄이거나 주 분사시기를 진각 시킬수록 NOx 및 Soot가 동시에 증가하는 경향으로 나타났다. NOx의 증가는 연소 개시 시점의 연소실 내 온도가 상승되었기 때문이며 연소 개시 시점의 연소실내 온도 증가로 인하여 에혼합 상태 동안 방출되는 에너지가 줄어

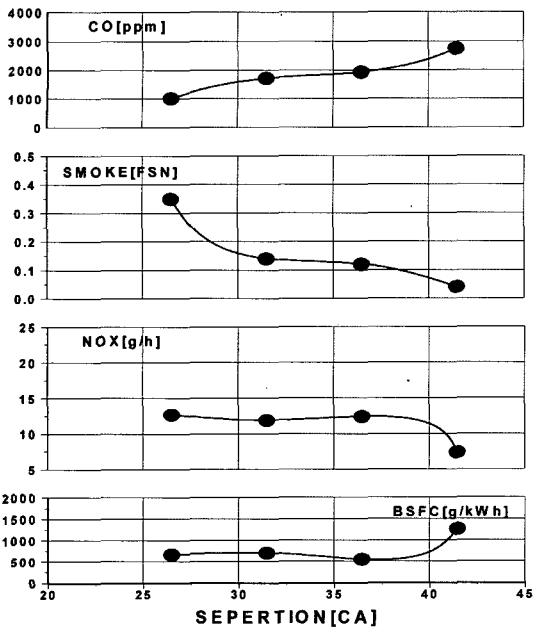


Fig. 9 Effect of pilot separation with mode 9

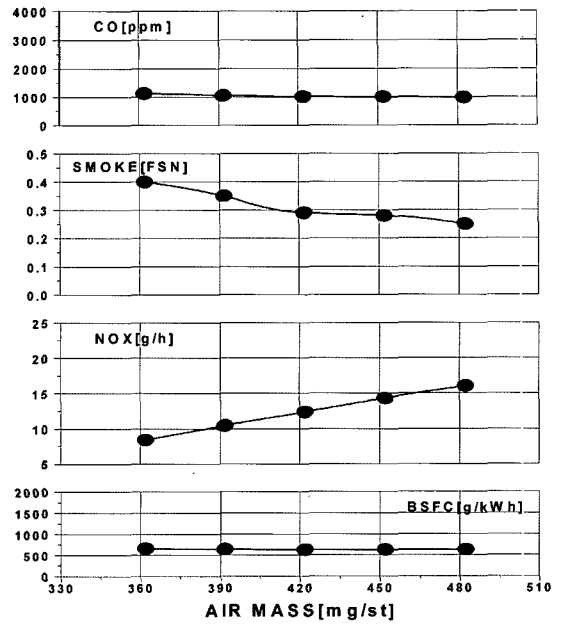


Fig. 11 Effect of inhaling air mass with mode 9

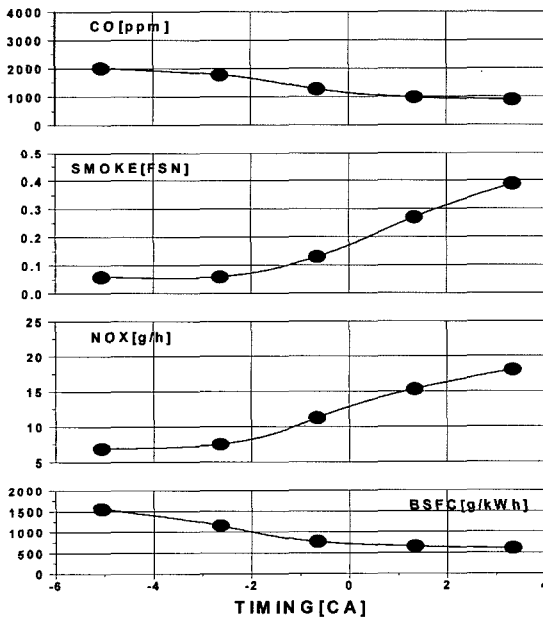


Fig. 10 Effect of main injection timing with mode 9

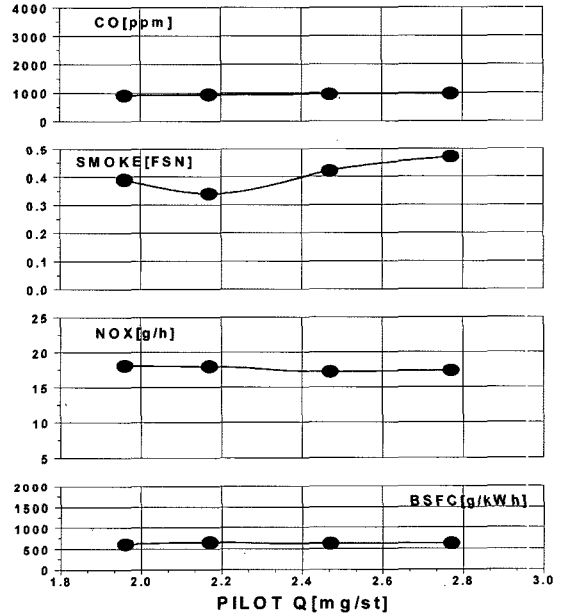


Fig. 12 Effect of pilot injection quantity with mode 9

들어 높은 soot를 형성하는 것으로 생각된다.³⁾

또한 공기량 및 파일럿 량을 증가시킬수록 NOx와 Soot는 trade-off되는 경향을 나타내었다.⁴⁾ 이로 부터 얻어진 결과들을 이용하여 최적의 연비가 나올 수 있도록 각 모드 점에서의 엔진 운전 파라메타

를 최적화하였다. Fig. 13은 엔진 하드웨어 및 운전 최적화 전후를 NEDC 14모드를 기준으로 비교한 결과이다. Fig. 13에 나타낸 바와 같이 연비, NOx 및 PM이 각각 7%, 12% 및 11%의 개선 가능성을 나타내었다.

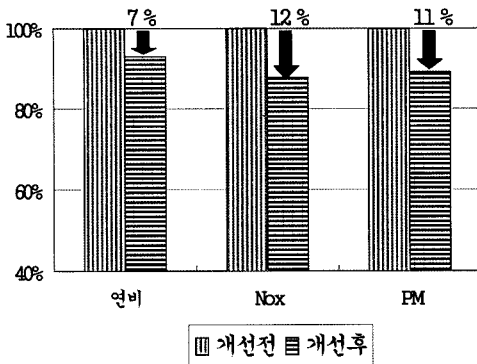


Fig. 13 Comparison of before and after engine operating parameters optimization for engine conditions

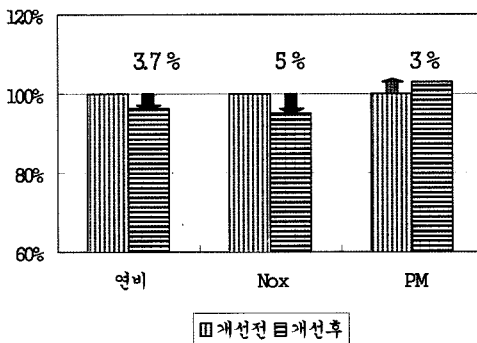


Fig. 14 Comparison of before and after engine operating parameters optimization for a vehicle

Fig. 13에서의 엔진 하드웨어 및 엔진 운전 변수를 차량에 적용한 결과 Fig. 14에 나타난 바와 같이 연비, NOx 는 각각 3.7%, 5% 개선되는 경향을 나타냈으나 PM은 3%로 악화되는 경향을 나타내었는데 이는 위에서 언급 하였듯이 본 연구에서 시험된 14 모드 점이 전체 NEDC 운전 궤적이 아닌 전체 궤적의 57% 정도를 대표하는 통계학적인 한계성에 기인하는 것으로 판단된다.

3. 결론

커먼레일이 장착된 HSDI 디젤 엔진의 연비 개선

을 위해 하드웨어 측면과 소프트웨어 측면의 연비 최적화를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 5홀 인젝터 대비 6홀 인젝터가 연비개선에 양호한 결과를 나타내었으며, 저속 저 부하 영역에서 연비 및 스모크 개선 효과가 크게 나타남을 확인하였다.
- 2) 인젝터, 오일펌프 및 오일 링의 하드웨어 개선과 매핑 파라메타 최적화 작업을 통하여 14모드 기준으로 연비, NOx 및 PM이 각 7%, 12%, 11%로 개선 가능성을 확인하였다.
- 3) 연비 최적화를 위해 NEDC 영역에 대한 모드 분석과 각 모드에서의 가중치 설정을 통하여 어느 운전 영역이 연비 저감에 기여하는지를 확인하는 모델 작성 및 검증 작업을 수행 하였다.
- 4) 대상 개발 결과를 반영하여 차량에 확인 한 결과 연비 및 NOx 는 각각 3.7% 및 5% 개선 경향을 나타내었으나 PM은 다소 악화되는 경향을 나타내었다.

References

- 1) J. S. Kong, J. Yu and C. S. Bae, "Effect of Geometric Shape (K factor) of Injector Hole on Diesel Spray Characteristics," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.367-371, 2001.
- 2) SAE International, Automotive Handbook, 5th Edn., Robert Bosch GmbH, pp.336-337, 2000.
- 3) M. Badami, F. Millo and D. D. D'Amato, "Experimental Investigation on Soot and NOx Formation in a DI Common Rail Engine with Pilot Injection," SAE 2001-01-0657, 2001.
- 4) A. N. Henein, M. C. Lai, I. Singh, D. Wang and L. Liu, "Emissions Trade-off and Combustion Characteristics of a High-speed Direct Injection Diesel Engine," SAE 2001-01-0197, 2001.