

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.2.081>

디젤 엔진의 연비 향상을 위한 저압 배기재순환 시스템의 적용에 관한 연구

김용래^{a,*} · 이용규^a

Improvement of Fuel Economy in a Diesel Engine by Application of Low Pressure EGR System

Yongrae Kim^{a,*} · Yonggyu Lee^a

^aDepartment of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Korea

*Corresponding author. E-mail: yrkim@kimm.re.kr

ABSTRACT

LP(low pressure)-EGR system was investigated to evaluate its potential on fuel economy improvement and NOx emission reduction in a diesel engine. A diesel engine was tested for the evaluation of LP-EGR system at both of steady-state and transient test. For a transient test, control logic for LP-EGR valve operation was developed and a NEDC mode test was conducted by using a vehicle status simulation test. The steady-state results showed that LP-EGR system can reduce more NOx emission or fuel consumption comparing to the conventional HP(high pressure)-EGR. From the NEDC mode test, this LP-EGR system showed a possibility to improve fuel economy without a penalty of emissions.

초 록

디젤 엔진에서 저압 배기재순환 시스템의 적용을 통한 질소산화물 저감과 연비 향상에 관한 효과를 확인하였다. 엔진의 정상 상태 및 과도 상태에서 시험이 진행되었으며, 차량상사를 통한 NEDC 모드 테스트를 위하여 별도의 제어로직도 개발되었다. 정상 상태의 시험결과에서 저압 배기재순환 시스템은 고압 배기재순환 시스템에 비하여 질소산화물 저감 및 연비 향상에 유리함을 확인하였고, NEDC 모드 테스트 결과로부터 배출가스의 증가없이 연비를 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Key Words: LP-EGR(저압 배기재순환), HP-EGR(고압 배기재순환), Diesel Engine(디젤 엔진), Fuel Economy(연비), NOx(질소산화물)

Received 30 December 2014 / Revised 6 March 2015 / Accepted 11 March 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2014년도 추계학술대회(2014. 12. 17-19, 강원랜드 호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

향후 강화되는 승용디젤엔진 차량에 대한 배

기 규제 대응 및 연비 개선을 위한 많은 연구가 수행되고 있으며, 배기가스 저감을 위한 다양한 방식의 기술들이 등장하고 있다. 현재 승용디젤 엔진 배기가스 저감 기술은 PM(Particulate Matter) 저감을 위한 DPF(Diesel Particulate Filter), NOx 저감을 위한 SCR(Selective Catalytic Reduction), LNT(Lean NOx Trap) 등과 같은 후처리 장치를 이용한 기술이 주로 사용 또는 개발 되고 있으나[1], 연비와 비용 상승 측면에서 단점을 가지고 있다. 따라서, 후처리 장치 이외에 엔진 대상의 연비 개선 및 배기가스 저감 기술 개발의 중요성이 증대되고 있으며, 최근에는 EGR(Exhaust Gas Recirculation)을 이용한 연비 개선 및 배기 가스저감 효과를 극대화하기 위하여 LP(Low Pressure)-EGR을 활용한 연구들이 이루어지고 있다[2].

본 연구에서는 승용디젤엔진에 LP-EGR 시스템을 적용하여 엔진 및 차량의 배기가스 저감 및 연비 개선 효과를 평가 하였다. 특히, 과도 운전 상태의 LP-EGR 효과 분석을 위하여 LP-EGR 시스템에 대한 제어 로직과 제어성능 개선을 위한 모델 기반 제어 로직을 개발하였으며, 최종적으로 유럽 배기 규제 시험 모드인 NEDC(New European Driving Cycle) 차량 시험을 통하여 연비 개선 효과를 확인하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시험 장치 구성

본 연구에 사용된 엔진은 Euro5 배기 규제 대응을 위하여 개발된 승용디젤엔진이며, 구체적인 엔진 제원은 Table 1과 같다. 이러한 엔진 기반 하에 LP-EGR 시스템을 적용하였으며, 이에 대한 설명은 다음과 같다.

LP-EGR 시스템은 DPF 후단의 저압 배기 가스를 터보차저의 컴프레서 전단으로 공급하는 EGR 시스템을 의미한다. Fig. 1은 LP-EGR 시스템의 개략도를 HP(High Pressure)-EGR과 비교하여 나타낸다. LP-EGR 시스템은 배기매니폴드에서 직접 흡기매니폴드로 배기가스를 공급하던

기존의 HP-EGR 시스템과 비교하여 DPF 후단의 상대적으로 저압의 배기가스를 이용하는데, 보다 긴 이동 경로와 인터쿨러에 의한 추가적인 온도 저감으로 인하여 공기 과잉율이 개선되는 효과가 있어 질소산화물 저감에 유리하다. 또한, EGR 가스의 실린더 간 분배성이 개선되며, 배기 매니폴더 후단의 모든 배기가스를 터보차저 터빈에 이용 가능하므로 터보차저의 효율을 개선할 수 있다[3,4]. 그러나 시스템의 구성이 복잡해지고 컴프레서 및 인터쿨러에서 부식 가능성이 발생할 수 있는 단점을 가지고 있으므로 LP-EGR 가스 유로에 추가적인 부식 방지 대책이 요구된다. 이를 위하여 부식에 강한 티타늄 코팅을 터보차저의 컴프레서 등에 보장하는 방안과 DPF 후단에 필터를 설치하는 방법이 효과적이다.

Table 1. Specification of test engine.

Number of Cylinders	6
Bore x Stroke	84 x 89 mm
Total displacement	2.959 L
Auxiliary system	Cooled EGR
Valve timing (IVO/IVC, EVO/EVC)	13°BTDC/34°ABDC 55°BBDC/15°ATDC
Injector Type Hole /con-angle / HFR(cc/30 sec)	Piezo Type 7 / 153 / 383

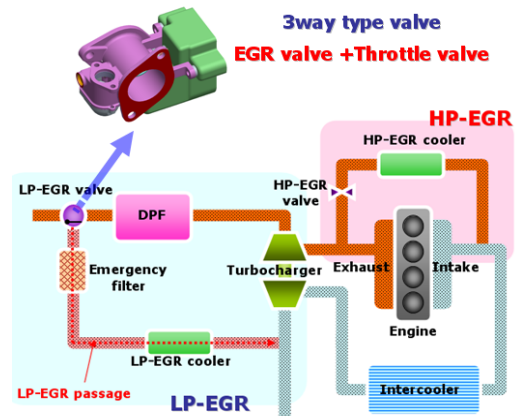


Fig. 1 Comparison of LP-EGR and HP-EGR.

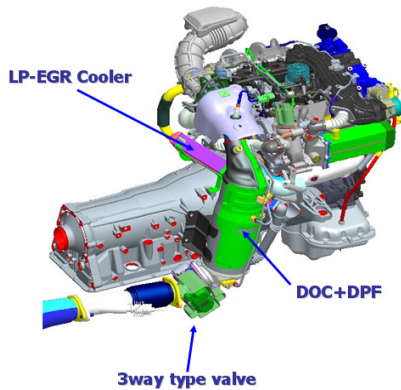


Fig. 2 LP-EGR system layout.

본 연구에서는 LP-EGR 시스템을 구현하기 위해서 EGR 밸브와 배압 밸브의 역할을 동시에 수행하는 LP-EGR 제어 밸브를 DPF 후단에 장착하였다. Fig. 2에는 디젤엔진에 장착된 LP-EGR 시스템의 구성을 나타내었다.

2.2 실험 방법

Fig. 3에는 디젤 엔진의 주요 성능을 평가하는 일반적인 구성을 나타내었다. 엔진의 속도와 토크를 제어하는 동력계와 연비 계산을 위하여 연료의 유량을 측정하는 유량계, 배출가스 농도 측정을 위한 배기가스 분석기 등이 주요 실험 장치이다.

LP-EGR의 기본적인 효과를 파악하기 위하여 정상 엔진 운전 상태에서 EGR량을 변화시키는 스윙 시험을 우선 수행하였으며, 연비와 배출가스 등을 측정하였다. EGR량 변화는 엔진 제어기에서 EGR 밸브의 개도를 변경함으로써 이루어지고, 운전 조건에 따라 5~6 포인트 정도로 변경하여 데이터를 저장하였다.

3. 실험 결과 및 제어로직 개발

3.1 정상 상태 실험 평가 결과

연비 관점에서 중요한 부분부하인 주요 세 가지 운전 영역(1500 rpm/BMEP 4 bar, 2000 rpm/ BMEP 6 bar, 2000 rpm/BMEP 10 bar)에

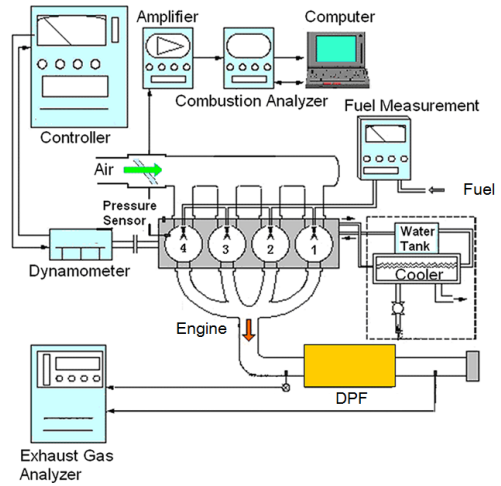


Fig. 3 Engine experimental setup.

서 각각 HP-EGR과 LP-EGR을 단독으로 적용시 EGR 스윙 시험을 진행하였으며, Fig. 4~6에 세 가지 시험 조건에 대한 시험 결과를 연비(BSFC, Brake Specific Fuel Consumption)와 배출가스(Smoke)의 관점에서 표기하였다. 동일한 NOx 배출량을 기준으로 BSFC와 Smoke가 작을수록 각각 연비와 배출가스가 낮다는 것을 의미한다.

HP-EGR을 사용하는 경우와 대비하여 LP-EGR을 사용 시에는 흡입 공기와 EGR의 혼합 가스가 인터쿨러를 통하여 연소실 내로 유입되게 되므로 냉각효과를 크게 유도할 수 있으며, 흡입되는 혼합 가스의 온도를 낮춤으로써 저온 연소로 인한 NOx 저감 효과가 더욱 클 것으로 사료된다. 그러나, LP-EGR 단독 적용시에 배출가스 저감 관점에서는 유리하지만 연비 측면에서는 미소하게 불리해지는 특성이 나타나고 있으며, 이러한 현상은 전체 EGR량 증대에 따른 연소 악화와 LP-EGR량의 증가를 위해 사용한 배압 증가에 따른 펌핑 손실에 기인한다.

Fig. 7은 2000 rpm/BMEP 6 bar 시험 조건에서 LP-EGR 밸브 개도를 30%로 고정 시킨 후, HP-EGR만 단독으로 스윙 시험한 결과를 나타낸다. LP-EGR만을 적용한 결과보다는 배출가스 저감 효과가 줄어들었으나, 연비 측면에서 상당히 개선되는 효과를 보여준다. 다만 배출가스의 경우에 Smoke는 저감되지만 CO의 경우에는 저온

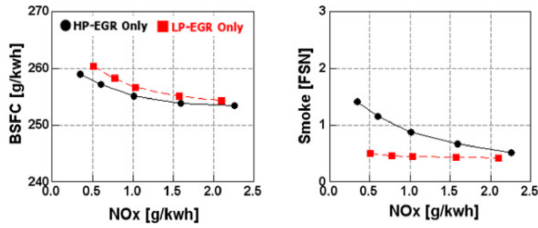


Fig. 4 EGR swing result (1500 rpm, BMEP 4 bar).

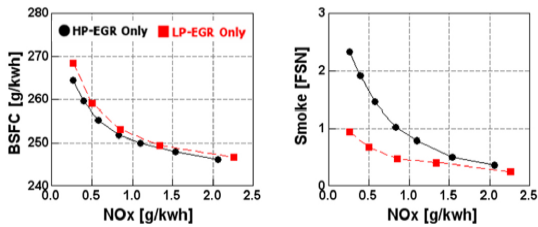


Fig. 5 EGR swing result (2000 rpm, BMEP 6 bar).

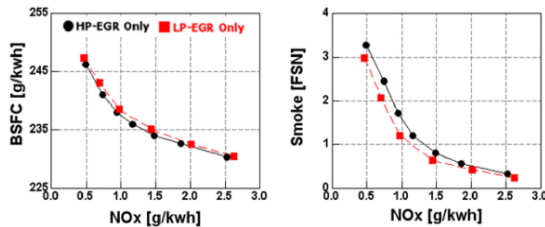


Fig. 6 EGR swing result (2000 rpm, BMEP 10 bar).

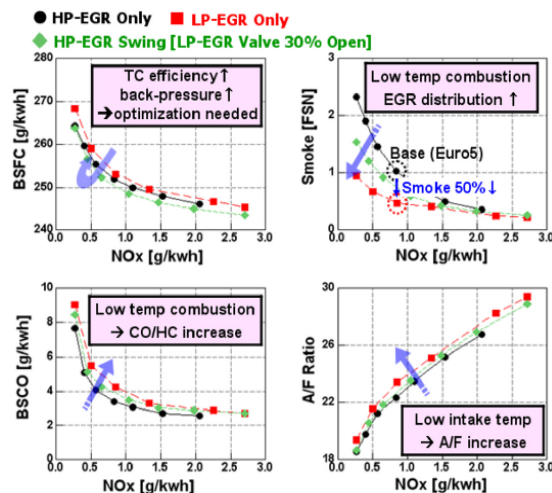


Fig. 7 HP-EGR swing result in constant 30% LP-EGR valve position at 2000 rpm, BEMP 6 bar.

연소로 인한 불완전연소로 인하여 다소 증가하는 결과를 보였다. 공연비(AF ratio)가 증가된 결과로부터 저온 EGR 효과로 인하여 흡기 매니폴드의 공기 온도가 낮아졌음을 다시 한번 확인할 수 있다. 이 결과로부터 연비 개선을 위해서는 각 엔진 운전 영역에서 LP-EGR과 HP-EGR이 적절하게 혼용되어야 함을 알 수 있으며, 이를 실제로 적용하기 위해서는 엔진의 최적화 매핑 과정이 필요하다.

Fig. 8은 앞에서 테스트한 세 가지 주요 엔진 운전영역에서 HP-EGR만 적용한 경우, LP-EGR만을 적용한 경우, 그리고 HP-EGR과 LP-EGR을 동시에 적용하여 최적화 매핑을 수행한 결과를 상대 비교하여 나타내고 있다. 동일한 스모크 배출량을 기준으로 하여 연비(BSFC)와 NOx 배출량 결과를 비교 표시하였다. 최적화 매핑 결과에 따르면, 전체 EGR 중에서 LP-EGR과 HP-EGR의 비율은 1500 rpm/BMEP 4 bar의 경우 50:50, 2000 rpm/BMEP 6 bar의 경우 70:30, 2000 rpm/ BMEP 10 bar의 경우 85:15로 나타났으며, 평균적으로 연비 4~6%, NOx 30~40%의 개선 효과를 확인하였다.

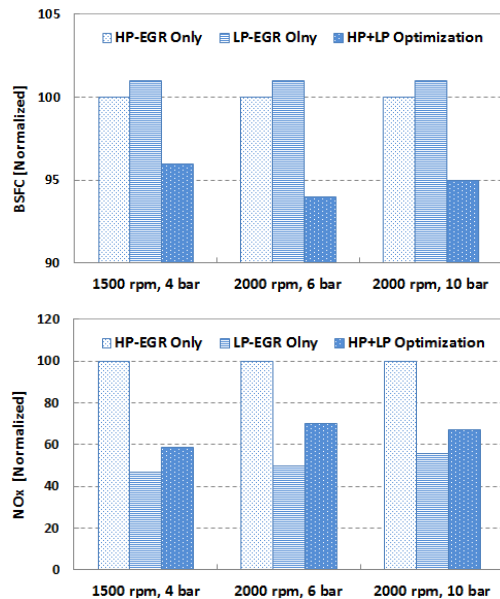


Fig. 8 Fuel economy and smoke emission result after optimization of each EGR system.

이상의 대표 운전 영역에 따른 시험 결과를 종합해 보면 엔진 운전 영역에 따른 연비 개선을 극대화하기 위해서는 중고속·중고부하 조건일수록 HP-EGR 대비 LP-EGR비중이 증대 되는 경향이어야 함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 기반으로 엔진의 전 운전 조건에서 LP-EGR 적용을 위한 엔진 최적화 매핑을 수행하였다. HP-EGR 시스템만으로 Euro5 배기기준을 만족하는 베이스 엔진과 동등한 NO_x, PM수준을 유지하면서 최대 연비 저감이 가능한 조건을 목표로 진행되었으며, HP-EGR 및 LP-EGR의 적용 비율을 중심으로 기타 엔진 운전에 관여되는 인자들(연료 분사시기, 과급압력 등)도 동시에 최적화 매핑의 대상에 포함되었다.

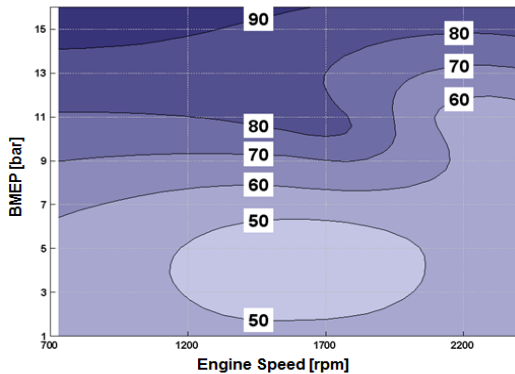


Fig. 9 LP-EGR fraction (%) within operating range.

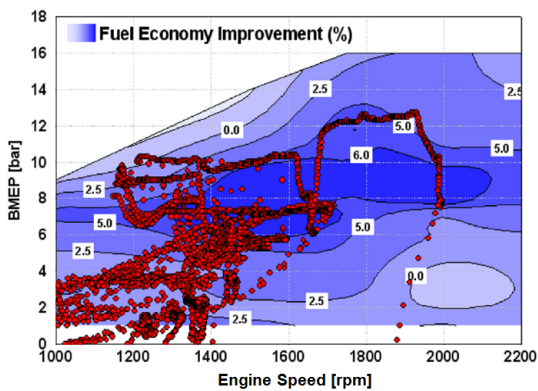


Fig. 10 Fuel economy improvement rate after application of LP-EGR system (Red dot: NEDC mode operation point of a vehicle).

최적화 매핑 결과로부터 Fig. 9는 전체 EGR 적용량 중에서 LP-RGR이 차지하는 비율을 보여 주며, Fig. 10은 최종적으로 엔진의 정상 상태에서 전 운전 영역에서 연비가 개선되었는데, 저속 저부하 영역 대비 중·고속, 중·고부하 영역에서의 LP-EGR 적용 효과가 증대됨을 확인할 수 있다.

3.2 LP-EGR 제어 로직 개발

최근 엔진은 과거와는 비교할 수 없을 정도의 복잡한 전자 제어 시스템이 적용되고 있으며, 제어 로직 개발의 중요성이 점차 확대되고 있다. 특히 디젤엔진의 경우 향후 강화되는 배기 규제 대응을 위하여 배출가스 저감을 위한 전자 제어 장치들이 증대되고 있기 때문에 정밀한 제어 로직 개발이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 LP-EGR 시스템 제어를 위한 PID제어 로직 및 제어 성능 개선을 위한 모델 기반 제어 로직을 개발하였으며, 과도 상태 평가를 통하여 성능을 검증하였다. LP-EGR 제어 로직은 ETAS社의 ASCET S/W를 이용하여 구현하였다.

Fig. 11은 전체 EGR 시스템에 대한 PID제어 로직의 개략도를 나타낸다. 기본적으로 EGR 제어는 목표 흡입 공기량을 만족하기 위하여 EGR 밸브의 개도를 제어하는 방식으로 이루어지는데, HP-EGR과 LP-EGR이 동시에 적용되는 경우에는 동시에 피드백 제어를 수행할 수 없기 때문에 하나는 오픈 루프 제어를 실시할 수밖에 없다. 저속 저부하의 경우 배압이 낮은 영역이기 때문에 DPF 후단과 터보차저의 컴프레서 전단의 차압으로 인하여 EGR이 유입되는 LP-EGR 시스템은 응답성 측면에서 불리하다. 그러나, 고

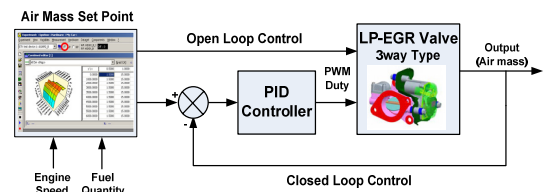


Fig. 11 EGR control logic concept.

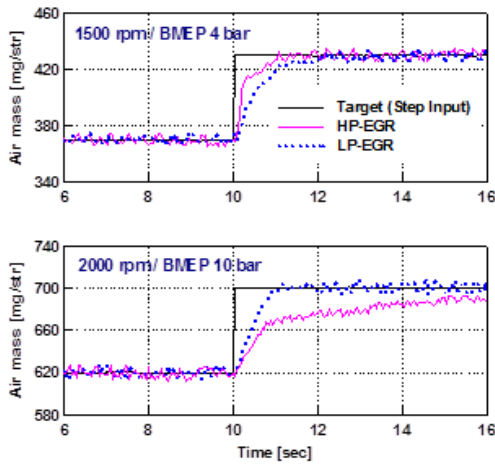


Fig. 12 EGR response test result.

속 고부하의 경우 HP-EGR 시스템의 터보차저 전단과 흡기매니폴드 사이의 차압이 LP-EGR 시스템 대비 상대적으로 낮기 때문에 LP-EGR의 응답성이 우수하다. 이는 Fig. 12에서와 같이 대표적인 저속 저부하 및 고속 고부하 운전 영역에서 주어진 목표 공기량을 추종하는 방식으로 EGR의 반응성을 테스트한 결과로부터 확인할 수 있다.

따라서, 저속 저부하 영역에서는 최종 목표 공기량을 제어하기 위하여 LP-EGR 시스템은 오픈 루프 제어를 하고 HP-EGR 시스템이 실제 PID 제어를 실시하는 것이 유리하다. 반대로 고속 고부하의 경우에는 LP-EGR 시스템이 PID 제어를 수행하고 HP-EGR 시스템은 오픈 루프 제어를 수행하도록 제어 로직을 구현하였다. Fig. 12와 같은 반응성 테스트를 추가로 수행함으로써 경계 영역을 설정하였으며, 제어 방식이 역전이 되는 영역에서는 일정 마진을 두어 영역의 경계 지점에서 두 제어 방식이 급격하게 친이되지 않도록 처리하였다.

3.3 NEDC 모드 차량상사 평가 결과

LP-EGR 시스템이 탑재된 차량의 실연비 개선 효과를 분석하기 위하여 유럽 배기 규제 시험 방식인 NEDC 모드에서 평가를 수행하였다. 차량에 직접 엔진을 탑재하는 대신, 엔진 시험실

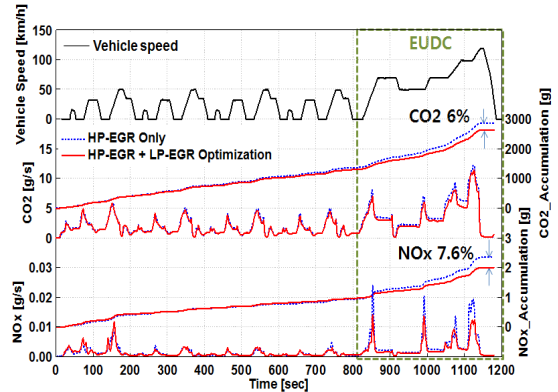


Fig. 13 NEDC mode test result.

조건에서 변속기를 포함하는 차량의 구동계 정보를 기반으로 주어진 차속을 추종하기 위하여 필요한 엔진 운전 조건을 계산하는 차량상사 시뮬레이션 소프트웨어를 적용함으로써 엔진이 작동하도록 하는 방법을 이용하였다. 이는 엔진의 매핑을 수시로 변경하면서 차량 상태에 미치는 영향을 엔진 시험실 안에서 실시간으로 파악할 수 있는 유용한 방식이다.

엔진 정상 상태에서 수행한 LP-EGR 적용 최적화 매핑을 기반으로 NEDC 모드 평가를 실시하고, HP-EGR만을 사용한 결과와 비교한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. HP-EGR만 적용된 차량은 기본적으로 Euro5 배기 규제 기준(NO_x 0.14 g/km)을 만족하는 성능을 가지고 있다. NO_x 측정치와 연비를 파악할 수 있는 CO_2 측정 결과를 실시간 배출량 및 총누적량으로 각각 나타내었으며, 결론적으로 HP-EGR 만을 적용한 결과와 비교하여 LP-EGR 시스템이 적용된 경우에 연비 6%와 NO_x 7.6% 개선 효과를 확인하였다. 또한, 이 그래프의 총누적량 데이터를 통하여 정상 상태 엔진 시험 결과에서와 같이 저속, 저부하로 운행 되는 전반부 구간보다는 중·고속, 중·고부하로 주로 운행되는 후반부(EUDC) 구간에서의 LP-EGR 적용 효과가 크다는 것을 재확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 LP-EGR 시스템을 적용하여 엔진 정상 상태 및 NEDC 모드 평가를 통한 연비 개선 효과를 평가하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 정상 상태 시험평가를 통하여 LP-EGR 시스템의 연비 개선 및 배출가스 저감 효과를 확인하였고, 저속 저부하 영역 대비하여 배압이 충분히 확보 되는 중속 중부하 영역 이상에서 LP-EGR의 효과가 증대되었다.
- (2) 엔진 과도 구간의 LP-EGR 시스템 제어를 위한 로직을 개발하였으며, 엔진 운전 영역에 따른 응답성 평가를 통해 LP-EGR과 HP-EGR의 제어 전략을 수립하였다. 또한, LP-EGR 제어 성능 개선을 위하여 모델 기반의 제어 로직을 개발하였으며, 기존 PID 제어 대비 제어 성능 개선 효과를 확인하였다.
- (3) 차량상사시험을 NEDC 모드 조건에서 수행한 결과, LP-EGR 시스템이 추가된 경우에 차량 연비 6% 및 NOx 7.6% 개선 효과를 확인하였다.

References

1. Neely, G., Sasaki, S., Huang, Y., Leet, J. and Stewart, D., "New Diesel Emission Control Strategy to Meet US Tier 2 Emissions Regulations," *SAE 2005 World Congress & Exhibition*, Detroit, M.I., U.S.A., SAE 2005-01-1091, April 2005.
2. Langridge, S. and Fessler, H., "Strategies for High EGR Rates in a Diesel Engine," *SAE 2002 World Congress & Exhibition*, Detroit, M.I., U.S.A., SAE 2002-01-0961, Mar. 2002.
3. Chatterjee, S., Conway, R., Viswanathan, S., Blomquist, M., Klüsener, B. and Andersson, S., "NOx and PM Control from Heavy Duty Diesel Engines Using a Combination of Low Pressure EGR and Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter," *SAE 2003 World Congress & Exhibition*, Detroit, M.I., U.S.A., SAE 2003-01-0048, Mar. 2003.
4. Andersson, S., Akerlund, C. and Blomquist, M., "Low Pressure EGR Calibration Strategies for Reliable Diesel Particulate Filter Regeneration on HDD Engines," *SAE 2002 World Congress & Exhibition*, Detroit, M.I., U.S.A., SAE 2002-01-2780, Oct. 2002.
5. Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., U.S.A., 1988.
6. Vigild, C.W., "The Internal Combustion Engine - Modelling, Estimation and Control Issues," Thesis of Ph. D., Technical University of Denmark, 2002.
7. Guzzella, L. and Onder, C.H., *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*, Springer, New York, N.Y., U.S.A., 2004.