

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.8.665>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

Off-Road 기계식 디젤엔진의 EGR Map 적용에 따른 배출가스 특성 연구

김훈명*† · 강정호* · 한다혜* · 하형수* · 정학섭** · 표수강** · 안중규***
* 자동차부품연구원, ** 국제종합기계, *** 한국기술교육대학교

A Study on Exhaust Gas Characteristics of Off-road Mechanical Diesel Engine According to EGR Map Application

HoonMyung Kim*, JeongHo Kang*†, DaHye Han*, HyeongSoo Ha*, SuKang Pyo**,
HakSup Jung** and JuengKyu Ahn***

* Green car Powertrain R&D Center, KATECH

** Dept. of R&D center, Kukje Machinery Company

*** Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ. of Technology and Education

(Received January 13, 2014 ; Revised May 21, 2014 ; Accepted June 11, 2014)

Key Words: Exhaust Emission(배출가스), Exhaust Gas Recirculation(배기가스 재순환장치), Mechanical Diesel Engine(기계식 디젤엔진), Non Road Transient Cycle Mode(NRTC 모드), Off-road Vehicle(비도로용 차량)

초록: 최근 대기환경 개선에 대한 관심이 대두되면서 화석연료를 사용 하는 기관에 대한 배출가스 저감 연구가 활발하게 진행 되고 있다. 본 연구는 이러한 저감 기술 중 NOx를 저감하기 위해 가장 많이 적용 되고 있는 EGR system을 Off-road 기계식 디젤엔진에 적용하였을 때 나타나는 배출가스 특성을 파악 하기 위하여 진행되었다. EGR system 적용을 위하여 먼저 엔진의 운전영역에 대한 배출가스 특성을 파악하였고, 각각의 엔진회전수 조건에서 다양한 EGR 조건을 적용하여 NOx 저감을 위한 최적 EGR 율을 도출하였다. 이에 따라 수정된 EGR 맵 적용 조건의 엔진 배기 특성에 대해 NRTC 모드를 구현하여 EGR 미적용 조건 및 기존 맵과 비교 및 고찰하였으며, 그 결과로 EGR 미적용 조건 대비 NOx가 약 42% 저감됨을 보였다.

Abstract: Because reducing atmospheric pollution is becoming a serious issue, studies are actively focusing on exhaust gas reduction. This study was conducted to determine the emission characteristics when applying an EGR system, the main approach used for NOx reduction, to an off-road mechanical diesel engine. For the application of the EGR system, the emission characteristics in consideration of the engine conditions were analyzed. The optimum EGR ratio for NOx emission reduction was determined by applying variable EGR conditions for each engine speed condition. Considering the above process, the emission characteristics of the modified EGR condition are compared with those of other conditions (non-EGR and existing EGR condition) in the NRTC mode. Consequently, NOx emission was reduced by around 42 compared with the non-EGR condition when using the modified EGR map.

1. 서 론

현재 대기환경에 대한 관심이 높아지고 있으며, 유해가스 주요 발생 원인으로 내연기관이 대

두되고 있다. 이로 인해 배출가스에 대한 규제가 강화되고 있으며 이러한 배출규제를 만족시키기 위해 고효율, 저 배출가스를 발생하는 디젤 기관에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 배출규제도 강화되고 있으며,⁽¹⁾ 비도로용 차량에 대한 규제 만족을 위한 연구가 진행 중에 있다.

† Corresponding Author, kimhm@katech.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

비도로용 차량 대부분은 디젤기관으로 배출가스 중 NOx 저감을 위해 EGR system을 적용하였다. EGR system은 배출가스를 연소실로 재순환 시키는 방식으로 실린더 내 연소온도 상승을 억제시켜 NOx 배출량을 저감시킨다.^(2,3) EGR system은 장착위치에 따라 HP(High Pressure) EGR과 LP(Low Pressure) EGR으로 분류할 수 있다. LP EGR의 경우 DPF 후단에서 과급기 전단으로 공급하는 방식으로 낮은 온도의 배출가스를 공급할 수 있어 NOx저감 효율에 큰 장점 있다. 그러나 낮은 온도의 배출가스에서 발생하는 응축수로 인한 EGR system 부식의 단점을 가지고 있다. HP EGR의 경우 과급기의 전단 압력과 흡기 매니폴드의 압력 차이를 이용하기 때문에 비교적 고온의 배출가스 유입으로 LP EGR의 단점을 보완할 수 있어 현재 HP EGR 기술이 가장 보편화 되어 많이 적용되고 있다.

본 연구에서는 기계식 디젤기관의 NOx 저감을 위해 HP EGR system에 산정된 EGR 램프를 적용하여 NRTC 모드에서 기계식 디젤엔진 EGR 최적화에 따른 적용성을 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 구성

기계식 디젤엔진에 EGR system을 적용하기 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 실험의 개략도이다. 본 실험에 사용된 엔진은 3,400cc급 기계식 디젤엔진이며, 세부 제원은 Table 1과 같다. 엔진동력계는 AVL사의 ALPHA 240kW를 사용하였고, 매연 측정 장비는 AVL사의 AVL 439, 배기가스 측정은 Horiba사의 MEXA-9100D EGR을 사용하였다. EGR 시스템은 전자식 EGR 밸브와 DC 제어 시스템을 적용하여 다양한 조건에서 제어가 가능하게 하였다.

2.2 EGR system

본 실험은 터빈 전단의 배기와 컴프레서 후단 흡기와의 압력차를 이용하는 방식인 HPL(High Pressure Loop) EGR system으로 실험을 진행하였다. EGR 정밀 제어 및 높은 응답성 확보를 위해 DC용 valve를 적용하였으며, EGR은 TPS(Throttle Position Sensor)와 PSS(Pump Speed Sensor)를 이용하여 피드백 제어방식을 채택하였다.

Table 1 Specification of test engine

Type	4 stroke/ 6cylinder
Displacement volume(cc)	3,409
Max. power(PS) @ rpm	82ps @ 2,500rpm
Fuel supply system	DI-Injection
Intake system	Inter Cooler

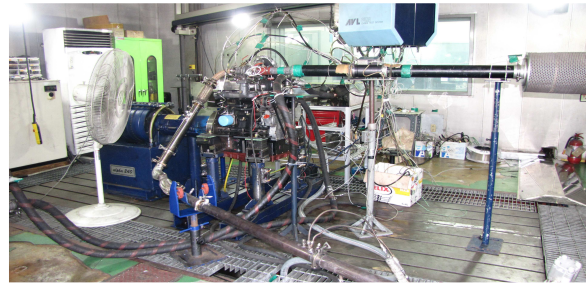


Fig. 1 Photograph of experimental apparatus

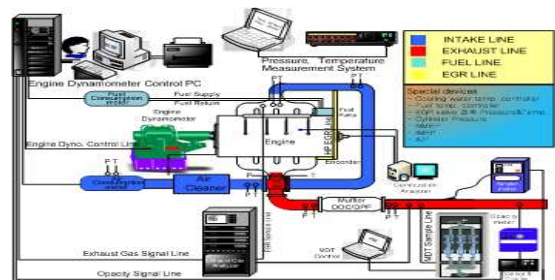


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

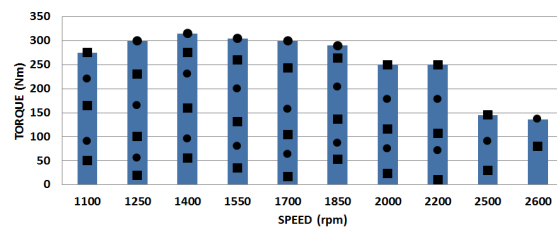


Fig. 3 Basis of selection EGR map (part load)

2.3 실험 방법 및 EGR 맵

Fig 3과 같이 EGR duty 산정 시 부분부하조건에서 엔진회전수 1,100rpm에서 2,600rpm까지 측정하며, 부하는 각 회전수의 토크를 5단계로, 각 지점의 EGR duty값의 변화는 95에서 5까지 측정하였다. EGR 율을 구하는 공식은 아래 수식 (1)과 같으며, CO_{2[In]}: 흡기매니폴드, CO_{2[Ex]}: 배기관, CO_{2[Amb]}: 대기 중 CO₂농도이다. 본 연구에서는 이를 고려하여 선정된 EGR 맵을 NRTC(Non Road Transient Cycle Mode) 모드를 통해 적용하였다.

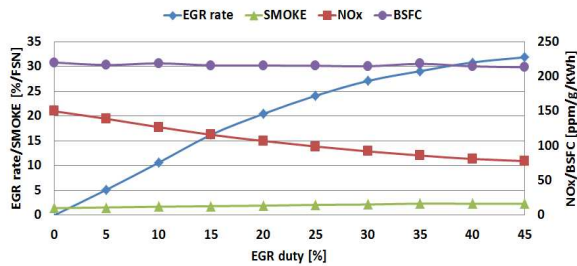


Fig. 4 An example of emission based on 1,400rpm by EGR duty

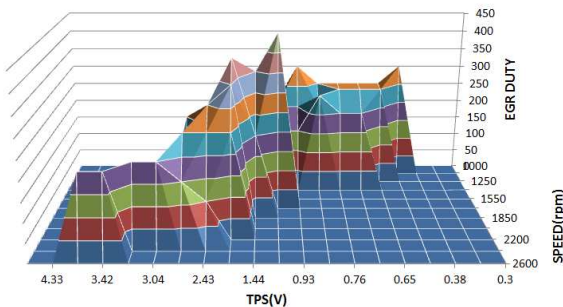


Fig. 5 EGR duty by speed and voltage

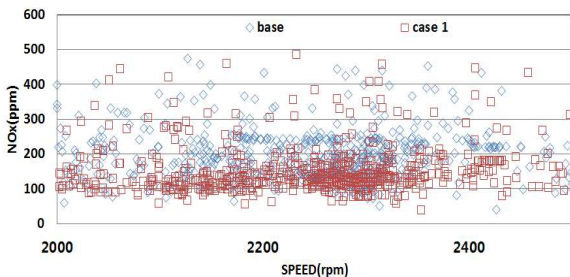


Fig. 6 Comparison of base condition and existing EGR map condition about NOx emission

NRTC 모드란 non-road 엔진의 배기가스 인증을 위해 개발된 총 1238s 간의 비정상 주행 사이클이다.

$$EGR_{rate} = \frac{CO_{2[IN]} - CO_{2[Amb]}}{CO_{2[Ex]} - CO_{2[Amb]}} \quad (1)$$

3. 실험결과

3.1 EGR 맵 산정

Fig. 4는 EGR 맵을 산정하는 과정의 예로서, 부분부하 실험 결과 중 대표적으로 엔진회전수 1,400rpm, 토크 55Nm를 일부 도시한 것으로 duty 적용에 따른 배출가스, 연료소비율 등 맵 산정 시 고려 사항을 나타내고 있다. 실험은 적용 맵에 따라 세 가지 파트로 나누어 진행하였으며, EGR 맵

산정 기준에 따른 배기특성 차이를 알아보기 위해 EGR 미적용 조건에 해당하는 base, NOx, SMOKE, BSFC의 각 최대 증가폭이 30%이하로 되도록 산정한 조건인 case 1, 그리고 EGR 율 30%, NOx 50%, SMOKE 50% 이하로 산정 조건을 변경한 EGR 맵을 사용한 조건인 case 2로 구성된다.

3.2 EGR 맵 비교

Fig. 5는 EGR 맵 적용에 따른 제어 인자 및 변수를 나타낸 것이다. 가로 방향은 엔진 회전수 나타내며 세로 방향은 TPS V(전압)값으로 EGR 밸브는 이 두 변수를 측정하여 매핑 시 입력된 EGR duty에 따라 밸브 개방 정도를 결정한다. Fig. 6은 base 대비 case 1 적용 시 엔진 회전수에 따른 NOx 저감을 나타낸 것이다. 엔진 회전수영역 900rpm에서 1,800rpm 까지 Fig. 8에서처럼 EGR duty가 0 부근에서 유지되어 EGR 비적용인 base와 비슷한 NOx발생을 확인하였고, 엔진 회전수 2,100rpm에서 2,400rpm 사이 구간의 NOx 발생량은 base대비 10% 감소하였다. case 1의 NOx 저감효과에 관해 엔진 회전수 2,000rpm에서 2,400rpm 사이 영역에서 EGR 적용성이 높게 나타났다, 이로 인해 특정 조건에서만 NOx의 감소가 이루어지는 것으로 나타났다. 효과적인 NOx 저감을 위해서는 엔진의 전체 영역에 대한 적용이 필요하다. 이에 따라 EGR맵 산정 시 변경 기준을 다르게 적용 하여 case 2 적용 결과 Fig. 7과 같이 NOx 저감 효과는 case 1보다 우수한 것으로 나타났다. 또한 case 2 적용으로 인해 case 1에서 저감 효과를 보이지 않았던 엔진 회전수 900rpm에서 1,800rpm 사이 영역에서 NOx가 감소되는 것으로 나타났다. Fig. 8은 EGR 맵 적용에 따른 duty를 나타낸 것이다. Fig. 8에서와 같이 case 1에서는 엔진회전수 900rpm에서 1,700rpm 사이의 영역에서 EGR duty는 0으로 EGR 밸브가 개방되지 않은 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 case 1에 대한 수정을 통해 EGR duty 증가를 꾀하였고, 이를 통한 배기 배출물 특성 변화를 고찰하고자 하였다.

3.3 EGR 맵 적용에 따른 배출가스 특성

3.3.1 EGR 맵 적용에 따른 NOx 특성

Fig. 9는 EGR 맵 적용에 따른 NOx 분포를 나타내며 본 연구의 실험조건인 base, case 1 적용

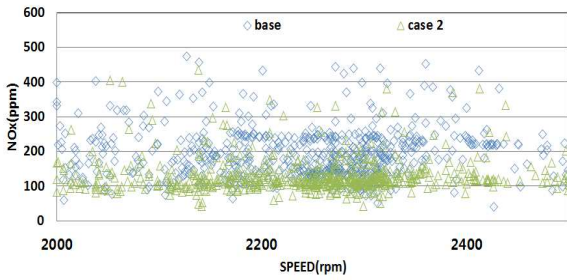


Fig. 7 Comparison of based EGR map and modified EGR map condition about NOx emission

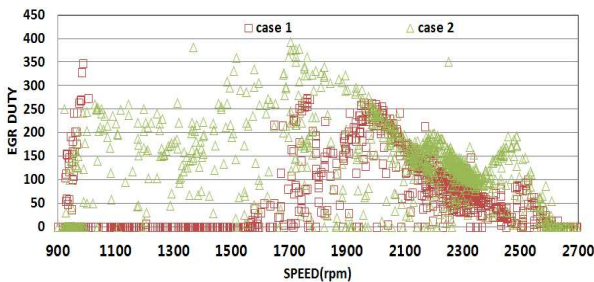


Fig. 8 EGR duty at deferent engine speed

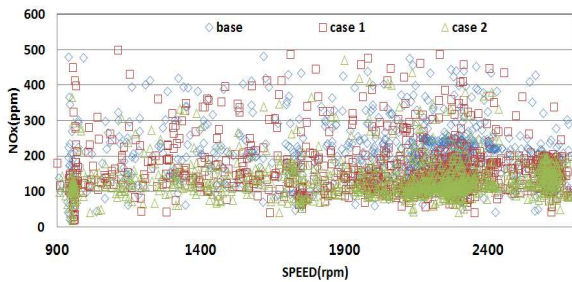


Fig. 9 Comparison of NOx emission in each engine speed

조건 및 case 2 적용 조건에서의 배출물 측정 결과를 엔진 회전수에 따라 정리하였다. EGR 시스템 비적용 조건인 base에서의 NOx 분포도 중 엔진회전수 2,100rpm에서 2,300rpm 사이 영역에서 NOx 발생이 높은 것을 확인할 수 있다. NRTC 모드 특성상 가장 많이 사용되는 운전영역은 2,100~2,300rpm인 것을 확인할 수 있다. EGR 시스템을 장착한 case 1과 case 2를 적용한 경우의 NOx 배출 특성 또한 base와 마찬가지로 회전수 2,100~2,300rpm 영역에서 동일한 분포를 나타낸다. 동일 실험조건에서 case 1의 경우 NOx 발생이 base 보다 약 100ppm 정도 감소함을 확인하였다. 또한 case 2를 적용한 경우 NOx 발생이 최대 327ppm으로 측정되었으며, base 에서의 최대 발생량 474ppm과 비교해 약 31% 감소하였다.

이와 같이 base 엔진에 EGR시스템을 적용 시 NOx의 농도는 기존의 연구결과와 마찬가지로 현저히 감소하는 것으로 나타났고, 엔진회전수가 2,100~2,300rpm인 고부하 운전조건에서 NOx의 농도가 급격하게 감소한 이유로는 저부하 운전 조건에서 공기과잉상태로 EGR의 영향을 적게 받는 반면 고부하 운전영역에서는 비교적 공연비가 농후한 상태이므로 EGR에 의한 상대적으로 높은 NOx 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 이에 따라 EGR의 엔진 적용 실험 시 고부하 조건일수록 NOx가 증가한 것으로 보이며 또한 연소실로 유입되는 비교적 높은 열용량의 혼합가스가 화염온도 상승을 억제해 산소의 고온반응이 억제되는 것으로 사료된다.

3.3.2 EGR 맵 적용에 따른 SMOKE 특성

Fig. 10은 SMOKE 측정 농도를 엔진회전수에 따라서 나타낸 것이다. EGR을 적용하지 않은 base 상태에서 전체 SMOKE의 발생농도는 10% 미만으로 나타났다. 세 실험 조건 모두의 1,900~2,700rpm 구간에서 SMOKE가 다량 배출되는데, 이는 시험모드 특성 상 고부하 및 급가감속운전에 의한 것으로 판단된다. case 1 적용 시 SMOKE 농도는 증가하는 것으로 나타났으며 특히 엔진회전수 2,300rpm 부분에서 base 보다 10% 증가하였다. 또한 case 2 적용 시 SMOKE 농도는 base 보다 증가하는 것 확인할 수 있으며, NRTC 모드에서 SMOKE는 100% 농도 까지 발생한다. 이는 급가감속구간에서 EGR 시스템 적용으로 인해 연료가 저온환경에서 연소되어 완전 연소 하지 못하고 배출되었기 때문으로 판단된다. 특히 case2에서 매연농도가 base 대비 급격하게 증가하며, 이는 EGR duty 증가로 인한 실린더 내 배기가스 유입과 급가감속 시 연소 공기 부족으로 인해 SMOKE가 과다하게 발생하는 것으로 판단된다.

디젤기관에서 SMOKE의 배출은 착화 지연, 연소가스온도, 열발생률, 연소기간 등의 영향을 받는데 EGR 율이 증가하면 연소에 필요한 흡입산소농도가 감소되면서 산화반응의 참여 기회가 줄어들어 부분적으로 착화, 혼합 등의 연소특성에 악영향을 끼쳐 SMOKE가 증가한다. 또한 EGR 적용 시 산소부족으로 인해 엔진 내 착화지연이 발생하여 이로 인한 불안정한 연소 및 연소온도 감소 등의 요인이 SMOKE 배출 증가에 영향을

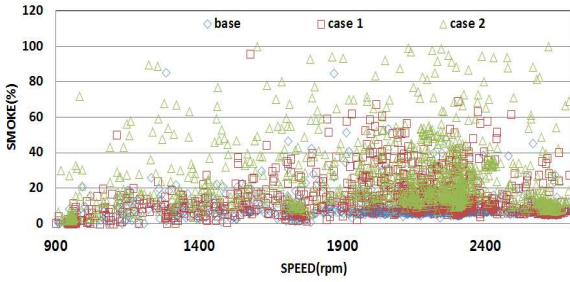


Fig. 10 Comparison of SMOKE emission rate in each engine speed

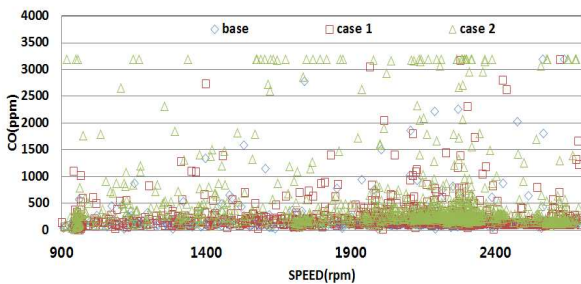


Fig. 11 Comparison of CO emission in each engine speed

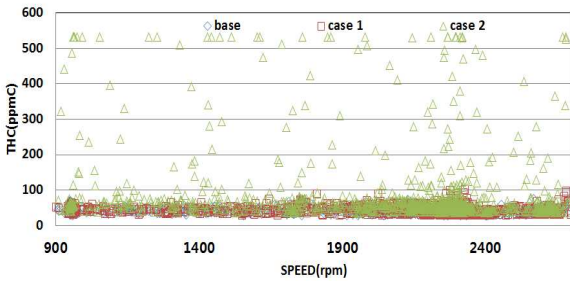


Fig. 12 Comparison of THC emission in each engine speed

주는 것으로 판단된다.⁽⁴⁾

3.3.3 EGR 맵 적용에 따른 CO 특성

Fig. 11은 CO를 나타낸 것이다. EGR 맵을 적용하지 않은 상태에서 CO의 발생은 500ppm 미만이다. EGR 맵이 적용되는 조건 중 특히 급가속 고부하 운전영역에서 3,000ppm 이상으로 높게 나타나며 이는 연소 시 부족한 산소로 인한 것으로 판단된다. case 1 적용 시 CO 측정 결과 엔진회전수 1,900~2,300rpm 일 때 최대 3,000ppm 까지 CO의 증가를 확인할 수 있다. 이는 고부하 운전영역으로 급가속과 같은 부하 조건 시 저온연소로 인한 것으로 사료된다. 또한 case 2 적용 시

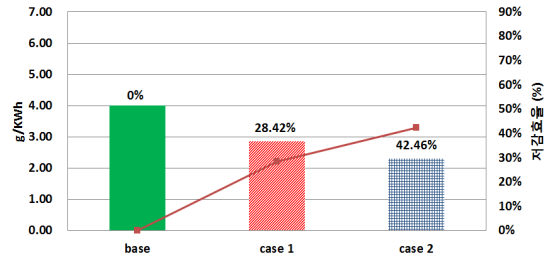


Fig. 13 Comparison of NOx emission in NRTC₁ mode

CO의 발생이 base 대비 증가하며 맵 적용으로 3,000ppm 이상 높은 발생 빈도가 나타남을 확인할 수 있다. 이는 적용 맵의 수정에 따라 EGR 율이 증가하면서 배기가스 유입량 또한 증가하여 CO에서 CO₂로의 산화반응을 억제하게 되어 CO가 산화되지 못하고 배출되게 되며, 추가적으로 급가속 구간이 많은 NRTC 모드 적용으로 인해 연료와 산소가 반응하는 시간이 짧고 흡입 공기의 산소량이 부족하여 CO의 발생이 증가하는 것으로 판단된다.⁽³⁾

3.3.4 EGR 맵 적용에 따른 THC 특성

Fig. 12는 THC 발생을 나타낸 것으로 base 상 태인 EGR 미적용 시 THC 발생은 100ppm 미만으로 나타났다. 디젤엔진에서는 희박 연소로 인해 THC의 배출은 적게 발생 한다. case 1을 적용 시 THC는 base 대비 최대 100ppm까지 소폭 증가함을 보이며, 엔진회전수 2,300rpm 부분에서 발생 빈도가 높은 것으로 나타났다. case 2를 적용한 결과로 500ppm 이상의 THC가 잦은 빈도로 발생하며 전체적으로 base 대비 다량의 THC 발생을 보인다. 이는 고온의 배기가스가 혼합되어 흡기 매니폴드 내 흡입공기의 체적 증가로 연소 시 신기 부족을 초래하여 이에 따른 저온연소, 연료소비량 증가, 출력 감소 등으로 THC 발생이 증가하는 것으로 보인다. 또한 배기가스 유입으로 인해 연소 시 열용량이 증가하여 화염온도가 낮아 지므로 저온연소로 인해 배출물이 증가하는 것으로 판단된다.⁽⁵⁾

3.4 NRTC모드 시험결과

EGR 맵 적용에 따른 NRTC 모드 운전조건에서의 시험결과를 분석하였다. Fig. 13은 NOx 배출량을 나타낸 것으로 base 대비 case 1에서는 28.42%

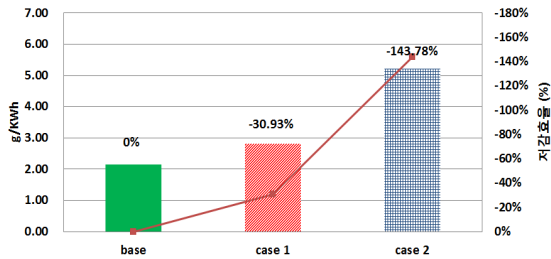


Fig. 14 Comparison of CO emission in NRTC mode

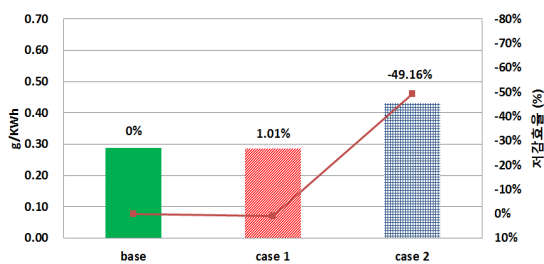


Fig. 15 Comparison of THC emission in NRTC mode

가 감소하였고, case 2에서는 42.46%가 감소했다. 이는 EGR 맵의 수정으로 인해 NO_x의 발생이 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 CO를 나타낸 것으로 base 대비 case 1은 30.93% 증가, case 2에서는 143.78%로 증가하였다. Fig. 15는 THC를 나타내는 것으로 base 대비 case 1에서 1.01% 감소하였고, case 2 적용 시 49.16%로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 EGR 맵의 수정을 통해 배출가스 재순환량의 증가로 인한 저온연소와 연소 시 산소의 희박으로 인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기계식 디젤엔진에 EGR system 적용과 EGR 맵을 산정하여 실험모드인 NRTC를 구현하였다. 실험 결과 배출가스 특성은 다음과 같다.

(1) EGR 적용으로 NO_x의 농도가 급격하게 감소하지만 저부하 운전 조건에서는 공기과잉상태로 인해 EGR의 영향을 적게 받는 반면 고부하 운전영역에서는 비교적 공연비가 농후한 상태이므로 EGR에 의한 높은 NO_x 저감효과를 얻을 수 있다.

(2) SMOKE의 배출은 착화 지연, 연소가스온도, 열발생률, 연소기간 등의 영향을 받는데 EGR 율

이 증가하면 연소에 필요한 흡입산소농도가 감소되면서 산화반응의 참여 기회가 줄어들어 부분착화, 연료와 공기 혼합 등의 연소특성에 악영향을 끼쳐 SMOKE가 증가한다.

(3) CO의 증가하는 원인으로는 CO가 산화반응에 의해 CO₂로 변환될 때 EGR 적용으로 인해 배기가스가 유입되면서 연소 시 산소농도감소 및 저온연소를 유도하게 되어 CO가 산화되지 못하고 배출된다.

(4) 디젤기관에서 발생이 적은 THC는 EGR 적용으로 배출량이 증가한다. 이는 NRTC모드 중 급가감속 영역에서 산소가 부족해 불완전연소되며 또한 흡기의 열용량 증가로 인한 저온연소로 인해 THC 배출물이 증가한다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, D. S. and Lee, D. I., 2014, "Emission Regulations and Technology Trends on Off-highway Vehicles/Equipments," *Auto Journal* Vol. 36, No. 5, pp. 16~21.
- (2) Jeong, Y. I., Lee, J. W., Cho, G. B. and Kim, H. S., 2010, "Automotive & Environment," *Soongsil University Press*, pp.119~123.
- (3) Dronniou, N., Lejeune, M., Balloul, I. and Higelin, P., 2005, "Combination of High EGR Rates and Multiple Injection Strategies to Reduce Pollutant Emission," *SAE Paper 2005-01-3726*.
- (4) Bae, M. W., Ku, Y. J., Lee, B. S. and Youn I. J., 2006, "A Study on Effect of a Combined Plasma EGR System upon Soot, CO and CO₂ Emissions in Turbo Intercooler Common-rail Diesel Engines," *Transactions of KSAE*, Vol. 14, No. 4, pp. 1~11.
- (5) Bae, M. W., Ku, Y. J., Lee, D. Y. and Kim, C. S., 2004, "Effect of a Combined Turbo Intercooler Plasma EGR System on NO_x and THC Emissions in ECU Common-rail Diesel Engines," *KAS 2004-10*, pp. 116~128.