



건설기계의 배출가스 저감을 위한 대형 프로판 전용 엔진 개발

†김용래 · 박철웅 · 장형준 · 최 영 · 정문용* · 한명훈* · 정동훈*

한국기계연구원, *블루플래닛

(2023년 7월 24일 접수, 2023년 8월 22일 수정, 2023년 9월 13일 채택)

Development of Large-sized Propane Engine for Emission Reduction of Construction Machinery

†Yongrae Kim · Cheolwoong Park · Hyungjun Jang · Young Choi

Moonyong Jeong* · Myunghoon Han* · Donghoon Jeong*

Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103, Korea

*Blueplanet, Hwasung 18260, Korea

(Received July 24, 2023; Revised August 22, 2023; Accepted September 13, 2023)

요약

오래된 디젤 엔진을 탑재하고 있는 노후화된 건설용 기계 및 차량들은 보통 수명이 길기 때문에 최신의 배기 규제와는 동떨어진 수준의 유해한 배출가스를 계속 배출하고 있다. 따라서 이러한 구형 디젤 엔진을 최신 배기 규제를 만족하는 엔진으로 대체할 수 있다면 대기질 개선에 도움이 될 것으로 기대되는데, 건설 현장에서 손쉽게 구할 수 있는 프로판 연료를 적용한 엔진이 적합한 대안이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 6.8리터 CNG 엔진을 베이스로 프로판 전용 엔진을 개발하였으며, 가스 전용 인젝터, 배기가스재순환(EGR), 강화된 촉매 등의 기술이 적용되었다. 그 결과 동급의 디젤 엔진 출력 및 토크를 확보하는 한편 최신 배출가스 규제인 Stage-V 수준에서 질소산화물은 절반 수준에 해당하는 배출가스 성능을 달성하였다.

Abstract - Aging construction machinery and vehicles with old diesel engines usually have a long life span, so they continue to emit harmful emissions. Therefore, replacing these older diesel engines with engines that meet the latest emission standard is expected to help improve air quality, and engines with propane fuels, which are easily available at construction sites, can be an appropriate alternative. In this study, a propane fueled engine was developed based on a 6.8-liter CNG engine, and technologies such as gas injectors, exhaust gas recirculation (EGR), and enhanced catalysts were applied. As a result, nitrogen oxides achieved half of the emission performance at the Stage-V level, the latest emission standard, while securing diesel engine output and torque in the same class.

Key words : construction machinery, old diesel engine, propane engine, stage-emission standard

1. 서론

과거 경유버스를 천연가스버스로 교체하고[1], 배터리나 수소연료전지를 기반으로 한 전기자동차가 보급되는 등 차량에서 배출되는 배기가스를 줄이기 위한 노력은 여러 분야에서 이루어졌다. 그러나 산업

용 및 건설용 차량의 경우 고가의 첨단기술을 적용하기에는 비용면에서 현실적인 한계가 있기 때문에 연료를 바꾸는 등의 방법으로 대기환경 개선에 기여하는 것이 타당할 수 있다. 일반적으로 디젤 엔진을 사용하는 산업용 차량은 시간이 지날수록 입자상 물질이나 질소산화물을 더 심각하게 배출할 수 있다. 따라서 시내 버스의 경우에서와 같이 천연가스 엔진으로 대체하는 방법도 있으나 충전시설의 한계로 모든 지역에서 사용하기 어렵기 때문에 프로판처럼 비교적 구

†Corresponding author:yrkim@kimm.re.kr
Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

하기 용이한 연료로 전환하는 것이 현실적이다.

프로판 연료는 LPG의 주성분으로 국내에서는 이미 택시 등 승용차에 충분히 공급되고 있지만, 대형 차량에 단일 연료로 적용된 상용화 사례는 거의 없다. 과거 단일 프로판 연료가 아닌 LPG 연료를 적용하여 11리터 급의 엔진을 개발하였으나, 실용화에는 성공하지는 못하였다. [2] 프로판 연료의 경우 기존 연료처럼 용기를 직접 충전소에 가져가서 충전하는 방식이 아니라, 충전되어 있는 용기 자체로 판매가 되므로 필요한 상황에 따라서 용기 전체를 교체하는 방식을 사용할 수 있기 때문에 실제 산업 현장에서는 더 편리한 면이 있다. 본 연구에서는 해당 지원 과제의 목적에 맞도록 프로판 100% 로만 구성된 연료만을 대상으로 한다. 다만 프로판 연료는 압축 착화가 아닌 스파크 점화 방식을 사용해야 하기 때문에 동일한 사이즈의 엔진에서 기존 디젤 엔진과 유사한 토크 성능을 확보하는 것이 관건이다. 따라서 본 연구에서는 노후화된 건설 차량의 디젤 엔진을 프로판 엔진으로 대체함으로써 동등 이상의 출력을 확보하면서도 배기가스 측면에서 월등히 향상된 최신 Stage-V 규제 이상의 결과를 얻고자 함이 목적이다.

II. 실험 장치 구성 및 방법

2.1. 실험 장치 구성

본 연구에서 프로판 연료 전용 엔진을 개발하기 위하여 사용한 엔진은 CNG 연료를 사용하는 엔진으로 개발된 6.8L 급의 스파크 점화 엔진으로서 세부적인 특성은 Table 1에 표기하였고, 동력계를 포함한 전체 실험장치의 셋업 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 일반적인 엔진 성능 측정 장비 셋업과 동일한데, 동력계는 HORIBA의 HD460으로 본 실험에서 적용 가능한 출력 용량을 확보하고 있으며, 모드 테스트 측정이 가능하도록 과도 운전 제어가 가능한 시스템을 제어장치로 사용한다. 배기가스 배출량은 AVL i60-R2 벤치로 측정했고 AVL SPC 478 및 APC 489는 입자 물질 질량(PM) 및 개수 측정(PN)에 사용되었다.

2.2. 프로판 연료 공급 개조 및 실험 방법

베이스 엔진은 CNG 연료를 가스상으로 공급받아 레귤레이터를 거쳐서 쓰로틀 바디 후단에 인젝터를 사용하여 공급하는 방식을 적용하고 있다. 프로판 연료는 연료 탱크에서 액상으로 기화기에 공급되고 가스상으로 변경된 연료는 마찬가지로 인젝터를 통해서 쓰로틀 바디 후단에 분사된다. [3] 기화기에는 열량 공급을 위해 냉각수 배관이 연결되어 있고, 초기 냉간시에는 히터를 사용하여 기화를 시

Table 1. Engine specifications

Parameters	Specification
Cylinder number [-]	6
Displacement [L]	6.8
Bore x Stroke [mm]	107 x 126
Compression ratio [-]	10.6
The maximum power [PS]	240 @ 2,500 rpm
The maximum torque [Nm]	890 @ 1,500 rpm



Fig. 1. Test engine and an experimental setup

키는 방식을 적용하였다. 엔진 제어를 포함하여 연료 공급을 모두 제어할 수 있는 엔진 제어기(ECU)를 적용하였고, 배출가스 저감을 위한 삼원촉매를 배기계에 부착하였다.

본 개발 엔진의 비슷한 용량의 구형 디젤 엔진과 동등 수준의 토크 및 출력 성능과 Post Stage-V 규제를 달성하는 것이므로 배출가스 성능을 확인하기 위해서는 NRSC(Non-road Steady Cycle) 및 NRTC(Non-road Transient Cycle)의 두 가지 테스트를 모두 수행하면서 진행하였다. Post Stage-V로 제시된 배출가스의 수준은 기존 Stage-V 수준에서 질소산화물(NOx)만 0.4 g/kWh에서 0.2 g/kWh로 절반 이하로 목표가 제시되었다. 전 운전 영역에 대하여 연료량, 과급압 및 점화시기와 같은 제어 인자들을 최적화하는 매핑 작업을 수행한 뒤, 두 테스트 모드를 수행하면서 배출가스 수준을 확인하였다.

III. 실험 결과 및 논의

3.1. 엔진의 전부하 성능 결과

Fig. 2에는 프로판으로 개조된 엔진의 전부하 성능 결과를 나타내었다. 이는 앞으로 언급될 EGR을 포함

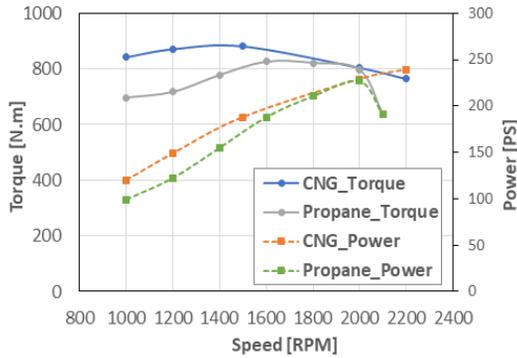


Fig. 2. Full load performance of a test engine

한 모든 매핑이 적용된 최종 결과이긴 하지만, 전부하 성능은 최대 연소 압력이나 허용 온도 조건에 의해서 제한이 되기 때문에 각 경우에서 크게 차이를 보이지는 않는다. CNG의 경우에는 상용 ECU 적용 조건에서 240 PS, 882 N.m 의 최대값을 보였는데, 프로판으로 개조한 본 엔진은 225 PS, 850 N.m 의 최대 성능을 확인하였다.

베이스 엔진의 CNG 연료를 적용한 경우와 비교를 하였으며, 저속 구간에서는 프로판 연료를 적용한 경우가 CNG의 경우보다 낮은 토크 수준을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 옥탄가가 CNG보다 낮은 프로판 연료의 특성으로 인하여 노킹이 발생하기 쉽기 때문에 동일한 공기량 공급 조건에서 연료를 더 이상 공급할 수 없기 때문이다. 특히 노킹 현상은 저속 구간에서 발생하기 쉽기 때문에 결과에서와 같이 저속 영역에서 토크의 차이가 크게 나고, 엔진 속도가 노킹에 대한 빈도가 줄어들기 때문에 거의 유사한 수준까지 출력을 확보할 수 있었다.[4,5]

2100rpm에서 출력이 급격하게 줄어든 결과는 본 개조 엔진의 개발 목표 출력이 그 이전에 달성되었기 때문도 있고, 엔진의 주 사용 대상이 건설 기계를 대상으로 하고 있기 때문에 일반 차량과는 달리 주행풍이 부족한 고속 영역에서 엔진 냉각의 부담이 커지므로 제한을 걸어둔 결과이다.

3.2. EGR 및 상세 매핑 적용에 따른 엔진의 배출가스 특성

본 프로판 개조 엔진에서 배출가스 수준을 목표 수준으로 달성하기 위해 주로 사용한 전략은 EGR 시스템 적용이다. 베이스 엔진에 기본적으로 EGR 시스템을 갖추고 있었으나, 초기에는 적용된 ECU에서 이를 제어하지 못하였기 때문에 EGR 없이 엔진 매핑을 진행하였다.(w/o EGR) 그 이후에 ECU에서 EGR 시스

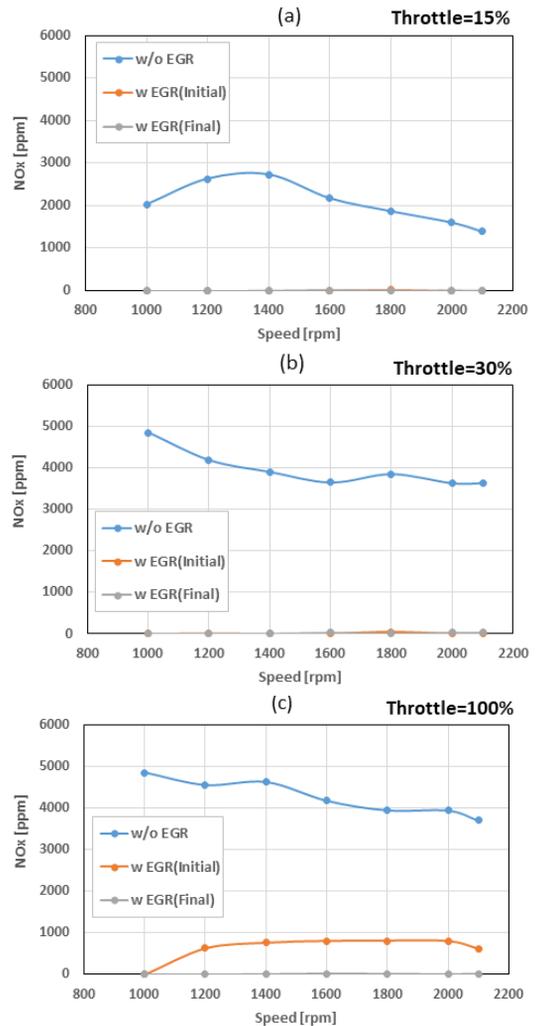


Fig. 3. NOx emission results according to the EGR application and fine tuning [(a) Throttle=15%, (b) Throttle=30%, (c) Throttle=100%]

템을 제어가능하게 되고 나서 단순히 EGR 만 추가 적용한 상태로 테스트를 수행하면서 결과를 비교하였다.(w EGR(Initial)) 마지막으로 이 결과들을 바탕으로 최종 배출가스 수준을 달성하기 위하여 모든 제어 변수들에 대한 미세 조정 매핑을 진행하면서 동시에 사용된 삼원촉매의 촉매 도포량을 약 30% 이상 강화하는 등의 작업을 수행하였다.(w EGR(Final))

이와 같은 세 단계의 결과를 정상 상태 운전 및 NRSC와 NRTC 테스트 결과로 비교하여 제시하고자

하며, 실제로는 과도 운전 테스트 결과인 NRTC의 경우가 목표로 하는 배출가스 수준을 달성하기 가장 어려웠기 때문에 이를 중심으로 세부 매핑을 진행하였다. 이러한 매핑 작업은 수많은 반복 작업을 통하여 진행되기 때문에 정확한 이론적인 배경을 제시하기는 어려우며, 앞서 언급한 것과 같이 각 단계별 대표 결과를 통해 매핑 전략의 방향만 분석하고자 한다.

우선 엔진 전체 영역 중에서 대표적인 저, 중, 고 부하 영역으로서 쓰로틀 신호 각각 15, 30, 100%를 지정하여 측정된 NO_x, CO, HC 및 배기온도 수준을 비교해 보았다. 이에 대한 결과들을 Fig. 3~6에 나타내었고, 모든 결과들은 배출가스가 삼원촉매를 거친 이후에 측정된 수치들이다. 3단계 쓰로틀 개도는 간격 차이가 다소 크긴 하지만, 매우 과격한 운전을 수행하는 NRTC 테스트 조건을 추종하기 위해 실제 쓰로틀 개도와 ECU 상의 레벨을 캘리브레이션해 놓은 결과이며 실제 부하 수준은 저, 중, 고 수준을 대표한다. EGR 적용에 따라서 동일 쓰로틀 기준 토크나 목표 당량비는 유사한 수준이 되도록 설정하였다.

첫 번째 결과로서 단순히 EGR만 적용하였을 때의 결과를 살펴보면, NO_x 배출 수준이 수천 ppm에서 수십 ppm 수준으로 저감된 것으로 볼 수 있으며 반면에 CO와 HC가 급격하게 증가하였다. EGR 적용을 통한 NO_x 저감 효과는 확인하였으나, CO와 HC는 늘어나는 일반적인 결과이며 특히 고속 영역에서의 증가가 두드러지게 나타났다. EGR 미적용시에 저속 구간에 발생하던 HC는 오히려 EGR 적용 이후에 감소하였는데, 이는 EGR 가스 공급에 따른 최종 배출가스 온도가 증가한 결과에 기인한 것으로 보인다. 최대 부하 조건에서 NO_x 배출량이 중저부하 대비 다소 높게 수백 ppm 수준인 것은 일반적으로 최대 부하 조건에서는 출력 확보를 위해 EGR을 최소화하여 적용하기 때문이다.

다음 단계에서는 정속 운전 조건에서의 결과를 포함하여 다음 절에서 언급할 예정인 모드 테스트 결과까지 종합적으로 고려하여 상세 매핑 작업을 진행한 결과를 비교 분석하였다. 가장 기본적인 방향은 가장 규제 수준이 높은 NO_x를 만족하는 것으로 하였으며, 촉매에서 NO_x 저감 효과가 가장 높도록 약간 농후한 혼합기 형성 즉, 이론공연비가 약 0.95~0.98 정도 영역이 되도록 공연비를 제어하였다.[6] CO 및 HC는 약간의 마진이 있는 상태였으나 이에 대한 보안을 위해 앞서 언급했듯이 촉매 도포량을 증가시켰다. 결과를 살펴보면 NO_x는 전영역에 걸쳐서 수 ppm 이내의 수준에서 제어되었고, CO는 처음 케이스보다는 증가된 수준이지만 전반적으로 다시 감소시킬 수 있었다. HC는 사실 가장 마진이 높은 상태였기 때문에 크게 신경을

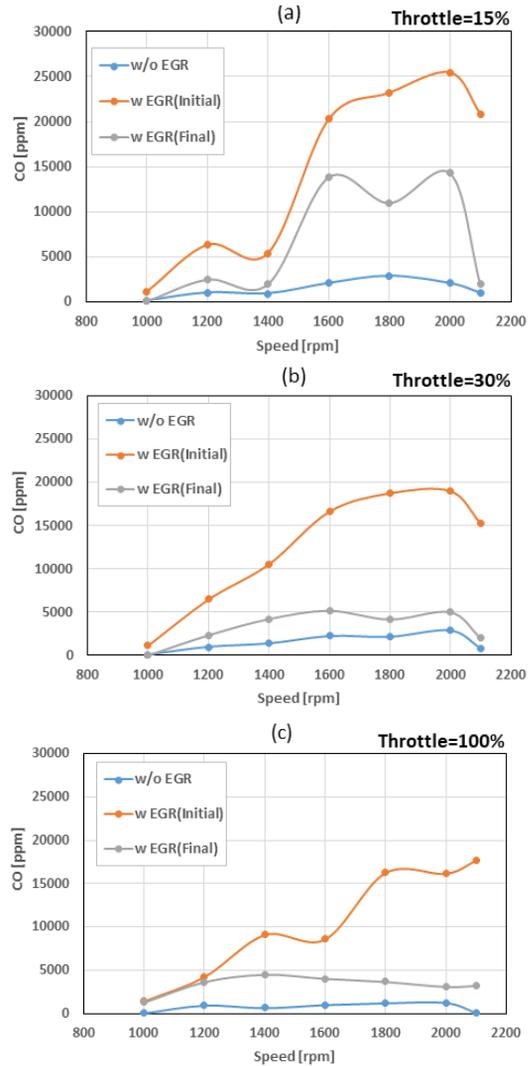


Fig. 4. CO emission results according to the EGR application and fine tuning [(a) Throttle=15%, (b) Throttle=30%, (c) Throttle=100%]

쓰는 항목은 아니었고, 결과적으로 중속 영역에서는 다소 늘어나긴 했으나 고속에서는 다시 감소시킬 수 있었다.

당량비 기준 0.02 수준의 농후한 조건에서 제어되었기 때문에 배출가스 온도는 가장 높은 수준을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 이는 촉매 활성화에도 긍정적인 영향을 주었을 것으로 사료된다.

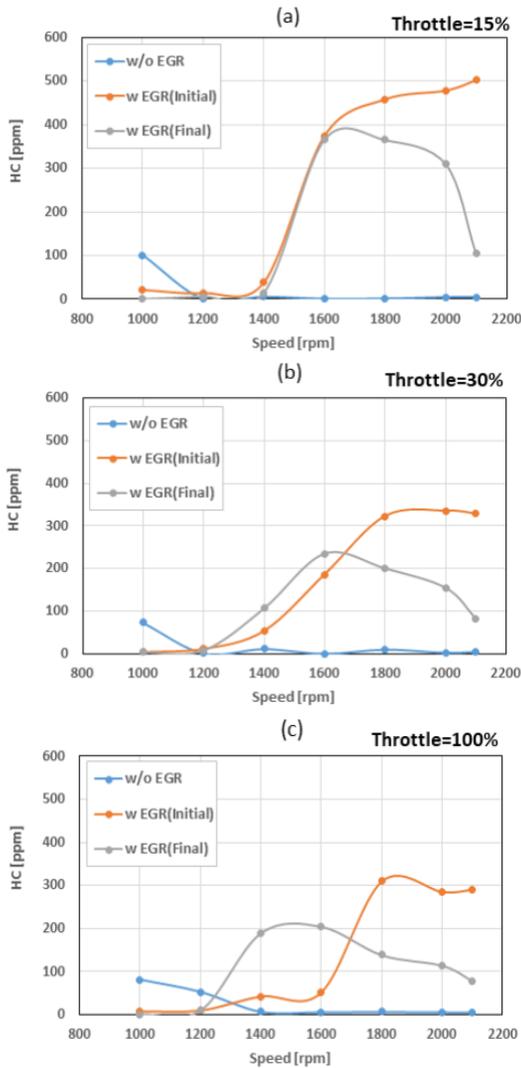


Fig. 5. HC emission results according to the EGR application and fine tuning [(a) Throttle=15%, (b) Throttle=30%, (c) Throttle=100%]

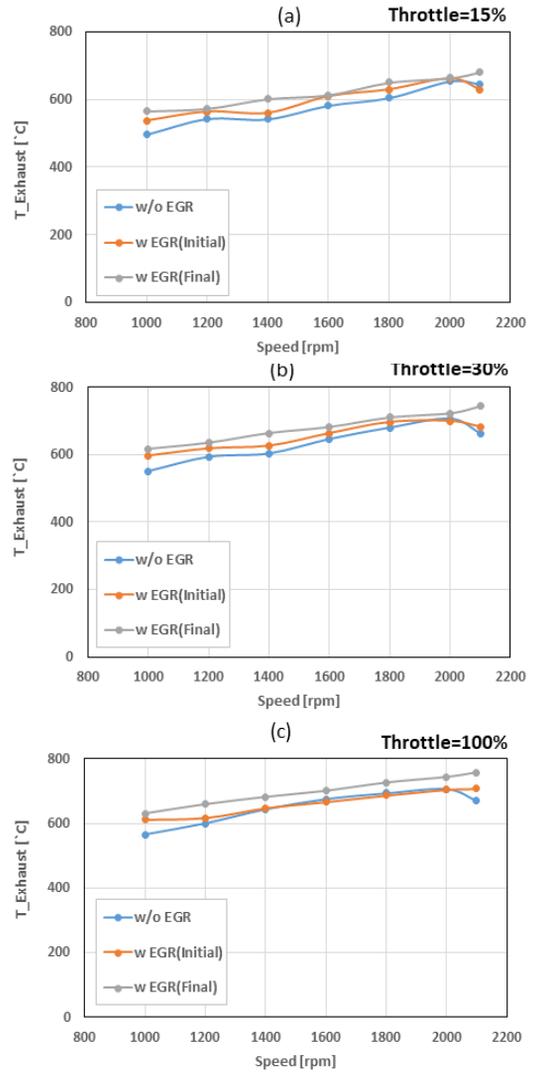


Fig. 6. Exhaust gas temperature results according to the EGR application and fine tuning [(a) Throttle=15%, (b) Throttle=30%, (c) Throttle=100%]

3.3. NRSC 및 NRTC 모드 테스트 결과

동일한 전략을 적용하였을 경우 실제 배출가스 수치를 정량적으로 확인할 수 있는 NRSC 및 NRTC 모드 테스트 결과를 비교 분석하였다. Table 2에는 프로판 개조 엔진의 최대 출력 수준을 고려하여 NRSC 모드를 위해 선정된 8가지의 운전 조건을 나타내었고, Fig.7에는 마찬가지로 엔진의 출력을 고려한 NRTC 모드를 나타내었다.

Table 3과 4는 NRSC와 NRTC 모드에서 각각 배출가스 달성 목표 수준과 실제 앞에서 제시한 매핑을 기준으로 테스트를 수행한 결과를 보여준다. 이미 언급한 것과 같이 두 테스트 모드는 동일한 수준의 목표를 만족해야 하는데, NO_x의 수준이 가장 낮기 때문에 이를 중심으로 모든 과정이 진행되었다. 정속운전 조건인 NRSC에서는 EGR 적용없이도 NO_x가 만족되지만, Fig. 7에서와 같이 초반부터 급격한 상태로 변경되는

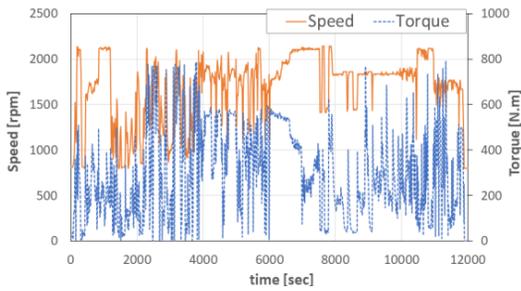


Fig. 7. Speed and torque profile of a NRTC test

Table 2. Engine operating points of NRSC test

Speed [RPM]	Torque [N.m]
2,000	750
2,000	562
2,000	375
2,000	75
1,500	775
1,500	581
1,500	387
800	-

Table 3. NRSC test results(Unit:g/kWh, #/kWh)

	CO	NOx	HC	PM	PN
Target	3.5	0.2	1.29	0.015	1.0×10^{12}
w/o EGR	1.64	0.12	0.23	0.001	2.3×10^{11}
w EGR (Initial)	2.77	0.02	0.36	0.003	8.9×10^{10}
w EGR (Final)	2.41	0.03	0.41	0.003	5.2×10^{10}

Table 4. NRTC test results(Unit:g/kWh, #/kWh)

	CO	NOx	HC	PM	PN
Target	3.5	0.2	1.29	0.015	1.0×10^{12}
w/o EGR	2.5	0.93	0.01	0.001	6.1×10^{11}
w EGR (Initial)	3.1	0.39	0.02	0.002	2.9×10^{11}
w EGR (Final)	2.5	0.05	0.02	0.001	2.7×10^{11}

NRTC 모드에서는 단순히 EGR 적용만으로도 0.2 g/kWh를 만족하기 어렵다. 다행히 CO와 특히 HC의 경우에는 마진이 남아있었기 때문에 앞에서 설명한 것과 같이 NOx 저감 중심의 세부 매핑을 적용할 수 있었고, 마지막에는 모든 수치를 만족하였다.

PM 및 PN의 경우에는 가스 연료 적용 엔진이라는 장점으로 인해 처음부터 문제가 되는 부분은 없었기에

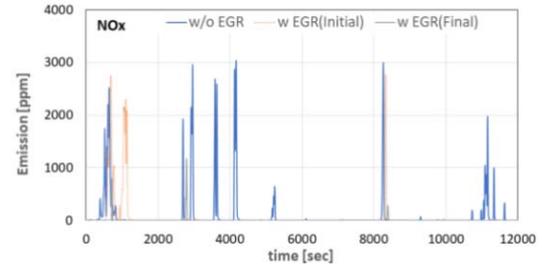


Fig. 8. NOx emission results of NRTC test according to the EGR application and fine tuning

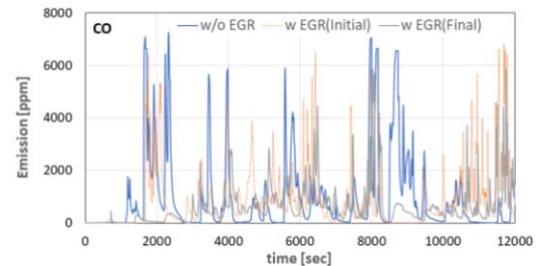


Fig. 9. CO emission results of NRTC test according to the EGR application and fine tuning

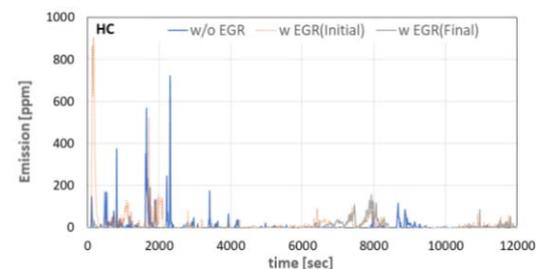


Fig. 10. HC emission results of NRTC test according to the EGR application and fine tuning

최종까지 규제치를 만족할 수 있었다.[7]

마지막으로 NRTC의 경우에 약 20여분의 테스트 동안 발생하는 NO_x, CO, HC의 실시간 배출량을 Fig. 8~10에 나타내었다. CO나 HC와는 달리 NO_x 배출량은 앞에서 제시한 정속 조건에서 상당량 저감된 결과를 보였기 때문에 주로 순간적으로 피크를 보이며 발생하는 것을 볼 수 있다. 흡기포트에 직접 연료가 공급되는 방식이 아니라 쓰로를 바다 후단에 공급되는 방식이므로 급격하게 변경되는 과도 운전 과정에서 목표하는 공연비를 추종하는 속도가 부족한 것이 원인인데,[8] 결과적으로는 이러한 영역을 가급적 줄일 수 있도록 매핑과 쓰로를 반응 민감도 조정이 반영되었기 때문에 최소한으로 감소시킬 수 있었다.

이상과 같이 개발된 프로판 전용 대형 엔진은 향후 노후 건설 기계에 디젤 엔진을 대체하여 탑재할 수 있도록 준비 중에 있으며, 실제 현장에서 반복되는 동일한 수준의 작업 수행이 가능한지 추후 검토할 예정이다.

IV. 결론

본 연구에서는 6.8리터 CNG 엔진을 베이스로 프로판 연료 전용 엔진을 개발하였으며, 이는 대형 건설 기계의 노후화된 디젤 엔진을 대체함으로써 유해한 배출 가스를 저감할 수 있을 것으로 기대한다.

1) 개발된 엔진은 동급의 디젤 엔진 출력을 상회하는 225 PS 출력 및 850 N.m 토크 수준을 달성하였다.

2) 본 연구의 목표 중 가장 달성하기 어려운 NO_x 배출가스 저감을 위하여 배기가스재순환(EGR)을 포함하여 강화된 촉매, 0.02 정도 농후한 수준의 공연비 제어, 과도 운전을 대응하기 위한 엔진 매핑 등을 적용하였다.

3) 최종 단계에서 NRSC 및 NRTC 모드 테스트를 통하여 Stage-V 배기규제 중 NO_x 배출은 절반 수준에 해당하는 0.2 g/kWh 수준을 만족하는 배출가스 성능을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “Post Stage-V 대응을 위한 중 대형 건설기계 LPG 엔진 개조 및 차량 적용 기술개발

(No. 202100339001)” 과제의 지원을 통해 작성되었기에 이에 감사를 포함합니다.

REFERENCES

- [1] Park, S., and Joo, J., “A Study on th Effects of the Replacement Policy of Diesel Buses with CNG for Abatement of GHG and Pollutants”, *Proceeding of KST Conference*, 438-442, (2011).
- [2] Kang, K., Kim, C., Lee, S., and Lee, J., “Development of a HD LPG Engine(K-1) Using Liquid Propane Injection System”, *Proceeding of KI GAS Conference*, 130-136, (2000).
- [3] Jeon, W., Kim, K., Choi, K., and Lee, D., “Study on Forced Evaporation System for Gaseous SI LPG Engines”, *Proceeding of KIGAS Conference*, 52-56, (2020).
- [4] Lee, S., Lim, G., Park, C., Choi, Y., and Kim, C., “Characteristics of Combustion and Emission for Synthetic Natural Gas in CNG Engine”, *KIGAS*, 19(6), 8-14, (2015).
- [5] Lee, J., Choi, H., Cho, H., Hwang, S., and Min, K., “Study on the Estimation of Knock Position in a LPG Engine with Ion-probe Head Gasket”, *KSAE*, 11(1), 42-48, (2003).
- [6] Murillo, S., Porteiro, J., Lopez, L., Granada, E., and Moran, J., “LPG: Pollutant Emission and Performance Enhancement for Spark-ignition Four Strokes Outboard Engines”, *Applied Thermal Eng.*, 25, 1882-1893, (2005).
- [7] Myung, C., Lee, H., Choi, K., Lee, Y., and Park, S., “Effect of Gasoline, Diesel, LPG and Low-carbon Fuels and Various Certification Modes on Nanoparticle Emission Characteristics in Light-duty Vehicles”, *Int. J. of Auto. Tech.*, 10(5), 537-544, (2009).
- [8] Kim, W., Lee, J., and Jang, C., “A Study on the Combustion Characteristics and the Control on the Fuel Flow Rate of LPG Intake Port Injection Engine”, *KSAE*, 8(6), 31-39, (2000).