

대형 가스엔진에서 CNG와 LPG 연료의 연소 특성 비교

†김용래 · 박철웅 · 장형준 · 이상호 · 최 영 · 이선엽

한국기계연구원

(2024년 3월 8일 접수, 2024년 4월 8일 수정, 2024년 4월 9일 채택)

Comparison of CNG and LPG Combustion Characteristics in a Large-sized Gas Engine

†Yongrae Kim · Cheolwoong Park · Hyungjun Jang

Sangho Lee · Young Choi · Sunyoep Lee

Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103, Korea

(Received March 8, 2024; Revised April 8, 2024; Accepted April 9, 2024)

요약

구형 디젤 엔진들을 대체할 수 있는 손쉬운 접근 방식은 CNG나 LPG와 같은 연료를 활용한 가스 엔진으로 대체하는 것이다. 그러나, LPG와 같은 연료는 대형 가스 엔진에 적용된 사례가 많지 않아서 CNG 연료를 기반으로 하는 가스 엔진에서의 성능을 예측하기가 쉽지 않다. 이에 본 연구에서는 CNG 기반 대형 가스 엔진에 LPG 연료를 적용하여 성능과 배출가스 특성이 어떠한지 살펴보았다. 특히, NOx 저감을 위해 널리 사용되는 EGR 적용 시에 어느 정도의 효과를 보이는지에 대해서도 시험을 통해 결과를 확인하였다. 그결과, LPG의 경우에는 심각한 노킹을 배제할 수준까지 운전 조건을 확보하였음에도 고부하에서 약한 수준의 노킹은 여전히 CNG보다는 빈도수가 높음을 알 수 있었고, 다만 고속 영역에서는 CNG와 유사한 출력 수준을 확보할 수 있었다. CNG보다는 빠른 연소 속도로 인해 LPG의 효율이 높았고, EGR 적용을 통해 NOx는 물론 동시에 약한 노킹의 빈도수를 동시에 저감 가능할 수 있음을 확인하였다.

Abstract - An easy approach to replacing older diesel engines is to replace them with gas engines using fuels such as CNG or LPG. However, fuels such as LPG have not been applied to large gas engines in many cases, so it is not easy to predict the performance of gas engines based on CNG fuel. Accordingly, in this study, we applied LPG fuel to a CNG-based large gas engine and examined the performance and emission characteristics. In particular, the results were confirmed through tests to see how effective EGR, which is widely used for NOx reduction, is applied. As a result, in the case of LPG, even though the operating conditions were secured to a level that excludes serious knocking, mild knocking at high loads was still found to be more frequent than CNG. However, it was possible to secure an output level similar to CNG in the high-speed range. Efficiency was higher due to a faster combustion speed than CNG, and it was confirmed that it was possible to simultaneously reduce NOx and the frequency of mild knocking through the application of EGR.

Key words : CNG, LPG, gas engine, knocking, EGR

1. 서론

전 세계적으로 운송 부문은 여전히 전체 이산화탄소

배출량의 약 37%를 차지하며 에너지 소비의 20% 이상을 차지하고, 이로 인해 결국 온실가스 배출의 약 14% 가량을 기여하고 있다.[1] 이를 줄이기 위해 청정 대체 연료 개발 및 응용에 대한 연구가 지난 수십년 동안 진행되어 왔다[2]. 그러나 대체 연료가 충분히 보급되기 위해서는 기존에 잘 구축된 연료 취급, 운송 및

†Corresponding author: yrkim@kimm.re.kr
Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

저장 인프라에서 상당한 수준의 개선이 필요한 상황이다[3]. 따라서 실행 가능한 대체 연료는 기존 인프라를 활용하는 것을 목표로 해야 한다. 동시에 이러한 연료는 스파크 점화(가솔린) 또는 압축 점화 엔진(디젤)에 사용되는 기존 연료에 비해 더 낮은 엔진 배기가스와 비슷한 효율을 보여야 한다. 이러한 관점에서 스파크 점화(SI) 엔진에서 대체 연료 개발의 초점은 효율을 높이고 노크(Knock) 한계를 확장하는 것이다. 노크는 화염 전면의 최종 가스가 높은 압력과 온도로 인하여 산발적으로 자발화되어 연소실에서 급격한 압력 상승과 충격을 일으키는 비정상 연소 현상인데, 이에 대한 저항이 큰 연료일수록 압축비를 증가시키거나 점화시기를 앞당길 수 있기 때문에 효율을 증가시킬 수 있다.

이로 인해 대체 저탄소 연료로써 널리 이용되고 있는 것이 천연가스(CNG)와 액화석유가스(LPG)이다. 국내의 경우 CNG 연료는 대형 시내버스용 엔진에 보급이 대부분 되어있으며, 일부 승용차량에도 개조 형식으로 사용되고 있다. LPG는 세금 정책을 바탕으로 택시용 승용차에 대부분 적용되었고, 일부 차량은 일반용으로도 판매가 되고 있는 등 꾸준히 적용되어 왔다. 본 연구에서는 대형 건설기계에 적용되는 기존 노후 디젤 엔진의 배출가스를 저감하기 위해 LPG 엔진으로 대체하는 작업을 수행하였으며, 이를 위하여 기존 양산되는 CNG 엔진을 기본으로 LPG 연료로 변경함으로써 여러 특성을 고려한 엔진 매핑이 반영되었다. 최대 출력을 위해서는 앞에서 언급한 것과 같이 노크 현상이 억제가 가능한 수준 파악이 필요하였으며, 질소산화물 저감을 위한 배기가스재순환(EGR) 장치를 적용할 때 어느 정도의 변화가 있는지 파악하는 연구를 수행하였다.

II. 실험 장치 구성 및 방법

2.1. 실험 장치 구성

본 연구에서 시험에 사용한 엔진은 CNG 연료를 사용하는 엔진으로 개발된 6.8L 급의 직렬 6기통 불꽃 점화 엔진으로서 세부적인 특성은 Table 1에 표기하였고, 전체 실험장치의 모습을 Fig. 1에 나타내었으며 기존 연구에서와 동일한 셋업을 구성하였다.[4] 동력계를 기반으로 하는 일반적인 엔진 성능 측정 장비 셋업과 동일하며, 동력계는 HORIBA의 HD460가 사용되었다. 배기가스 배출량은 AVL i60-R2 벤치로 측정되었다. CNG 가스연료는 전용 고압 용기에 충전되어 엔진으로 공급되었으며, 온도 유지를 위한 열교환장치가 배관에 추가된다. LPG 연료는 용기에서 액상으로 공급이 되며, 분사기를 통해 적정량이 CNG 가스

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

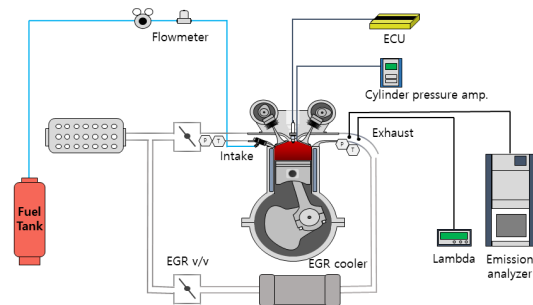


Fig. 1. Test engine and an experimental setup.

공급과 마찬가지로 쓰로틀을 바디 후단에서 기화되며 공급되는 방식이다. 엔진의 연소 압력을 측정하기 위해 점화플러그 타입의 압력센서(Kistler)를 장착하고, 연소해석기(Dewetron)를 이용하여 크랭크 앵글에 따른 연소 압력을 취득하여 비교 분석하였다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서 비교 대상이 되는 CNG 연료의 경우에는 대부분의 성분이 메탄(CH₄)가스로 구성되어 있으며, LPG 연료는 프로판으로만 구성된 상태로 시험을 진행하였다. 이로 인한 각 연료의 주요 특성은 Table 2에 나타내었다. 연료량 제어 관련해서는 기본적으로 삼원촉매를 활용하여 배출가스를 저감하는 개념이기 때문에 이론공연비 조건으로 운전하는 것을 기본으로 하였다.

기본적으로 각 연료를 적용함으로써 가능한 최대 출력 및 토크를 탐색하는 과정을 거쳤으며, CNG 연료의 경우에는 순정 ECU를 그대로 적용한 결과이고 LPG 연료에서는 매핑이 가능한 ECU를 통하여 점화시기와 같은 운전 변수를 변경하면서 진행하였다. 베이스 엔진이 2500 rpm 까지는 운전이 가능하지만, LPG 연료를 적용하여 개조를 수행한 경우에는 연료

Table 2. Properties of the test fuel

	LPG	CNG
LHV (MJ/kg)	47	50
Laminar flame speed (cm/s)	40.3	36.7
Autoignition temperature (°C)	475	540
HC ratio	2.65	3.69
Octane number (RON)	105	120

공급장치의 한계로 인하여 2000 rpm 까지만 최대 토크 조건으로 운전하였다. 각 운전 조건에서 특별히 비교하고자 했던 점은 노킹과 관련된 점이며, 기본적으로 노킹을 판별하기 위해서는 연소 압력 데이터를 활용하였다. 본 연구에서 사용된 Dewetron 연소해석기에서 제공하는 소프트웨어를 이용하여, 획득된 연소압력 데이터에 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행함으로써 약한 노킹으로 판별할 수 있는 수준의 사이클들을 취합하는 과정을 거쳤다. 최종적으로 각각의 시험 조건에서 500 사이클의 데이터를 취합하고 이 중에서 약한 노킹으로 판별되는 수를 노킹 빈도로 정의하였다.

부하변경에 따른 두 연료의 연소 특성 변화를 살펴본 뒤에는 질소산화물을 저감시킬 수 있는 EGR을 적용함으로써 노킹과 연소적인 측면에 어떠한 영향을 주는지 비교하는 시험을 수행하였다. EGR을 사용하는 경우에는 Fig. 1에서와 같이 쿨러를 이용하여 배기가스가 냉각되어 흡기 매니폴드로 공급되는데, 이 온도를 별도로 제어하지는 못하기 때문에 EGR 적용 시에 흡기 온도에 따른 영향이 정확하게 반영되지는 못하였다. 다만, 터보차저의 사용으로 인해 인터쿨러 후단 흡기 공기의 온도만 40 °C로 제어되었다. 본 연구에서는 2000 rpm, 600 Nm 조건에서 EGR 변경에 따른 결과를 비교 분석하였다.

III. 실험 결과 및 논의

3.1. 엔진의 전부하 성능 및 부하에 따른 연료 특성 차이 비교

Fig. 2 에는 CNG 및 LPG 연료를 적용한 엔진의 전부하 성능 결과를 나타내었다. 저속 구간에서는 LPG 연료를 적용한 경우가 CNG보다 낮은 토크 성능을 보이고 있다. 이는 기본적으로 옥탄가가 CNG보다 낮아서 노킹이 발생하기 더 쉽기 때문으로 볼 수 있으며 이러한 노킹으로 인해 최대 토크 수준이 결정된다. 특히 노킹 현상은 이론적으로 저속 구간에서 발생하기 쉽기 때문에 이번 결과에서와 같이 저속 영역에서 토크

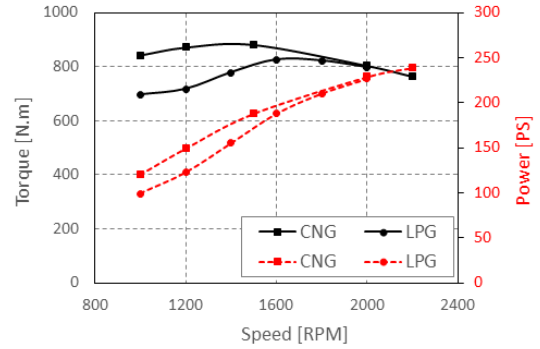


Fig. 2. Full load performance of a test engine.

의 차이가 크게 남을 볼 수 있다. 엔진 속도가 빨라지면서 노킹에 대한 빈도가 줄어들기 때문에 본 실험에서 확보한 2000 rpm 영역에서는 거의 유사한 수준까지 출력과 토크를 확보할 수 있었다.[5] 따라서 다음으로 비교할 엔진 부하별 연료 특성 비교에서는 2000 rpm 조건에서 토크 기준 500 Nm에서 최대 수준인 800 Nm까지의 영역을 대상으로 하였다.

테스트된 두 연료에 대한 열효율, CO₂, NO_x THC, 노킹 발생 빈도 및 연소 속도(MFB 10-90)에 대한 결과를 Fig. 3~5에 나타내었다. 열효율의 경우에는 과급 엔진 조건에서 마찰 및 펌핑 손실을 최소화한 결과, 엔진 부하가 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.[6] LPG는 동일한 엔진 부하에서 CNG에 비해 효율이 평균적으로 4~5% 향상된 결과를 보여주고 있다. 이에 대한 원인은 앞에서 언급된 LPG 연료의 빠른 화염속도로 인하여 연소 속도가 빨라졌음을 Fig. 5의 MFB 10-90의 데이터를 통해 확인이 가능하다. MFB(Mass fraction burned)는 연료가 연소된 정도를 의미하여 10과 90은 각각 연소된 % 수준을 뜻한다. 빠른 연소 속도로 인하여 열손실이 감소되었을 것으로 추정할 수 있고, LPG 연료의 경우에는 액상 분사이기 때문에 기화열 효과로 체적 효율 증대에 도움이 된 부분도 열효율 우위에 대한 근거가 될 수 있다.[7] CO₂ 배출의 경우에는 열효율의 우위에도 불구하고, HC ratio의 차이로 인해 LPG의 경우가 모든 부하 영역에서 높게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

CNG의 NO_x 값은 모든 엔진 부하에서 LPG보다 높은 것으로 관찰되었는데, 이는 CNG 연소의 경우가 최대 온도 수준이 더 높다는 것을 의미한다. THC는 중저부하 이하에서는 CNG가 높았으나, 고부하 영역에서는 LPG가 더 높게 나타나는 것으로 측정되었다. 마지막으로 노킹 빈도의 경우에는 CNG의 경우 모두 10회 미만의 안정적인 수준으로 측정되었으나, LPG의 경

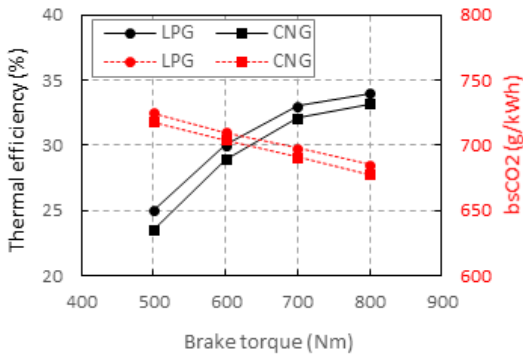


Fig. 3. Comparison of thermal efficiency and CO2 emission.

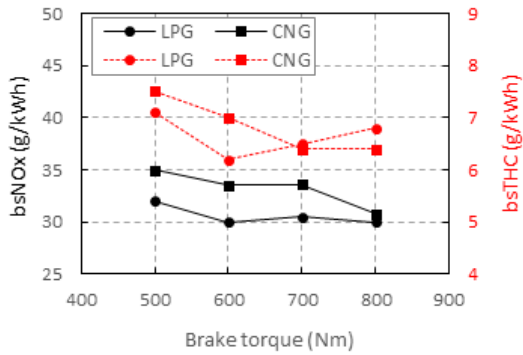


Fig. 4. Comparison of NOx and THC emission.

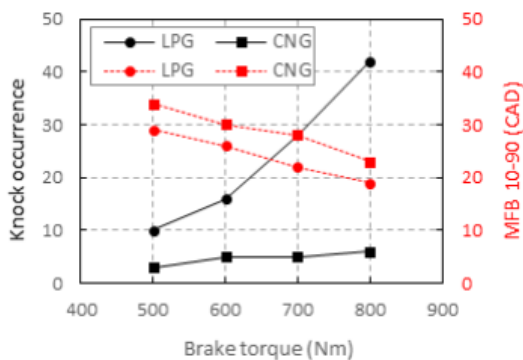


Fig. 5. Comparison of Knock occurrence and combustion duration.

우에는 부하가 높아질수록 점점 증가하는 경향을 보였다. 이는 앞서서도 언급되었듯이 연료의 특성에 기

인하는 요인으로 심각할 수준의 노킹은 피할 수 있게 매핑을 진행하였으나, 약한 수준의 노킹은 여전히 LPG 연료가 불리함을 알 수 있다.

3.2. EGR 적용에 따른 연료의 연소 및 배기 특성 비교

두 연료에 대한 엔진 평가에서 EGR을 적용한 경우 어느 정도의 성능과 배출가스에 영향을 주는지 확인한 결과를 Fig. 6-8에 나타내었다. 시험 조건은 2000 rpm 및 600 Nm의 속도와 부하 영역이며, EGR를 계산은 일반적인 배기와 흡기의 CO2량 측정 기반으로 수행되었다. 앞 부분에서 부하 변동에 따른 시험 결과와 같은 운전 조건이 있으나, EGR 변동에 따른 경향 차이를 명확하게 구분하기 위하여 EGR이 적용되지 않은 초기 조건에서는 점화시기 및 과급압력과 같은 일부 운전 조건을 변경하여 시험을 진행하였다. EGR이 적용되지 않은 조건에서 시작하여 연소안정성(COV) 기준으로 10%를 넘지 않는 수준 내에서 EGR을 증가시키면서 각 연료 조건에서의 결과를 살펴보았다.

우선 최대 EGR 사용 가능 영역에 대하여 비교해 보면, LPG의 경우가 35%까지였고 CNG는 30%까지로 LPG가 더 넓은 범위를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 설명한 것과 같이 LPG가 CNG에 비해 좀더 빠른 화염 속도를 가지고 있기에 연소 안정성 측면에서 유리한 점에 기인하였다고 보여진다. 또한, 타 연구 결과에 따르면 EGR 희석으로 연소 온도가 낮아지는 저온 화학반응 구간에서는 루이스 수가 더 큰 LPG의 열확산이 더 크기 때문에 화염 속도 증가에 더 도움이 된다는 의견도 있었다.[8] Fig. 6에 따르면 노킹 빈도의 경우 EGR이 적용되지 않았을 경우 LPG가 더 많은 빈도를 보였으나, EGR이 추가될수록 두 연료 모두 감소하는 추세를 보임을 확인할 수 있었다. 특히 LPG의 경우가 감소 경향이 두드러지게 나타났으며, EGR을 많이 사용하는 경우에는 CNG와 유사한 수준의 노킹 빈도를 확보할 수 있음을 보였다. EGR 적용에 따라 노킹 빈도는 줄어들었으나 연소안정성은 반대로 불리해짐을 볼 수 있으며, 일반적으로 안정하다고 알려진 기준인 5%를 고려해 보면 LPG는 30% 초반, CNG는 20% 중반 영역까지가 적절한 가용 한계로 보인다.

열효율의 경우에는 두 연료 모두에 대해 EGR 적용에 따라 증가하는 경향을 보였으며, EGR의 이러한 영향은 펌핑 손실 및 연료 소비의 감소뿐만 아니라 저온 연소로 인하여 연소실의 열손실 감소 결과에 기인한다고 볼 수 있다.[9]. 그러나 COV 기준 EGR 한계점이 후에서는 불안정한 연소로 인해 연소 효율 자체가 감소함으로써 두 연료 모두 열효율이 급격히 감소하고 있는 모습을 보인다. NOx의 경우에는 EGR이 증가할

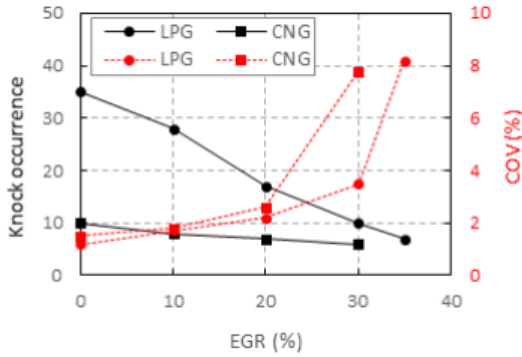


Fig. 6. Comparison of knock occurrence and COV according to EGR rate.

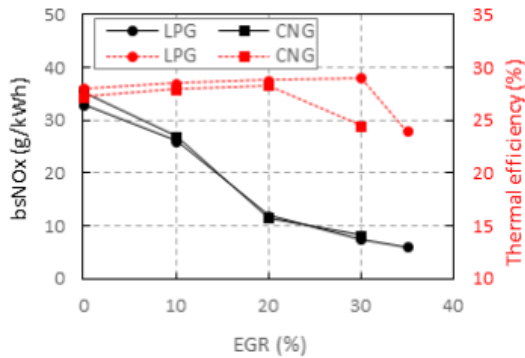


Fig. 7. Comparison of NOx emission and thermal efficiency according to EGR rate.

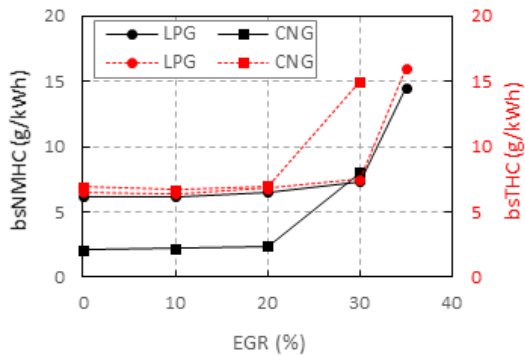


Fig. 8. Comparison of NMHC and THC according to EGR rate.

수록 두 연료 모두 계속 감소하는 모습을 보여주고 있다. NOx에 대한 EGR의 영향은 신기에 배기가스 유입으로 인하여 실린더 내 연료-공기 혼합물의 전체 열용량이 증가하면서 최대 화염 온도가 낮아져서 thermal NOx 발생을 효과적으로 감소시키기 때문이다.[10]

위의 NOx 배출 결과들은 필연적으로 Fig. 8에서와 같이 THC 발생량에는 반대의 결과를 보여주는 원인이 된다. 즉, THC 및 NMHC(Non-methane hydrocarbon)은 EGR 증가에 따라 동시에 배출량이 증가함을 Fig. 8으로부터 확인할 수 있다. 다만, LPG의 경우에는 두 배출가스 사이의 차이가 거의 없으나, CNG는 모든 EGR 적용 구간에서 일정 부분 차이가 존재하고 있음을 볼 수 있다. CNG의 경우에는 대부분의 성분이 메탄으로 구성되어 있기 때문에 미연 상태의 메탄 가스가 비중이 크므로 THC와 NMHC 사이의 차이는 대부분 메탄 가스 배출에 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 미연 메탄 성분을 제외한다면, NMHC 관점에서는 CNG가 LPG보다는 배출량이 더 낮은 것으로 측정되었다.

이상과 같이 CNG와 LPG 연료를 불꽃 점화 방식의 동일 대형 엔진에 적용하였을 때 EGR 적용에 따른 성능과 배출가스 영향을 살펴보았다. 추후에는 모드 시험을 통하여 과도 운전 조건에서도 두 연료 적용에 따른 차이점이 어떠한지 파악할 예정이다.

IV. 결론

본 연구에서는 6.8리터 CNG 엔진을 기본으로 하여 대부분 프로판으로 구성된 LPG 연료로 변경함으로써 연료의 연소 특성이 최대 출력과 효율 및 배출 가스에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 특히 EGR을 적용한 경우에 NOx 저감 및 노킹과 관련된 영향이 미치는 결과에 대해서도 관찰하였다.

1) 최대 출력의 관점에서는 저속 구간에서 노킹에 취약한 LPG 연료의 특성으로 인해 CNG에 비해서는 낮은 출력을 보였으나, 고속 조건일수록 유사한 수준의 출력 성능을 가지는 것을 확인하였다.

2) 2000 rpm 속도 조건에서 부하가 증가함에 따라 두 연료 모두 효율은 증가하였으나, LPG 연료의 경우에 연소 속도 우위로 인하여 CNG 보다는 효율이 좋은 것을 확인할 수 있었다. 다만, 약한 수준의 노킹은 부하 증가에 따라 LPG 연료에서 증가하는 모습을 보였다.

3) 2000 rpm, 600 Nm의 속도, 부하 조건에서 EGR을 적용하면서 살펴본 결과, 두 연료 모두 EGR 증대에 따른 NOx 저감 효과는 확연하게 보였으며 연소안정성은 악화되는 모습이 확인되었다. 연소안정성 5%이

내 기준을 만족하는 EGR 최대 적용가능한 영역은 LPG가 CNG보다 더 넓은 범위를 가지는 것을 알 수 있었다. EGR 적용은 LPG 연료의 노킹 빈도수를 줄이는데 효과적이었으며, 두 연료 모두에서 연소안정성 확보 범위 내에서는 열효율도 소폭 증대시킬 수 있는 효과를 보였다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “Post Stage-V 대응을 위한 중대형 건설기계 LPG 엔진 개조 및 차량 적용 기술개발 (No. 202100339001)” 과제의 지원을 통해 작성되었기에 이에 감사를 표합니다.

REFERENCES

- [1] Kalghatgi, G., Levinsky, H., and Colket, M., “Future Transportation Fuels”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 69, 103-105, (2018).
- [2] Bae, C., and Kim, J., “Alternative Fuels for Internal Combustion Engines”, *Proceedings of Combustion Institute*, 36(3), 3389-3413, (2017).
- [3] Kalghatgi, G., “The Outlook for Fuels for Internal Combustion Engines”, *Int. J. Engine Res.*, 15(4), 383-398, (2014).
- [4] Kim, Y., Park, C., Choi, Y., Jeong, M., Han, M., and Jeong, D., “Development of Large-sized Propane Engine for Emission Reduction of Construction Machinery”, *KIGAS*, 27(3), 91-97, (2023).
- [5] 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).
- [6] Szybist, J., Busch, S., McCormick, R., Pihl, J., Splitter, D., Ratcliff, M., and Miles, P., “What Fuel Properties Enable Higher Thermal Efficiency in Spark-ignited Engines?”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 82, (2021).
- [7] 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).
- [8] Ge, W., Chuahy, F., Zhang, P., and Zhao, P., “A Direct Numerical Simulation Study of the Dilution Tolerance of Propane Combustion under Spark-ignition Engine Conditions”, *Combustion and Flame*, 247, (2023).
- [9] Kar, T., Zhou, Z., Brear, M., Yang, Y., Khosravi, M., and Lacey, J., “A Comparative Study of Directly Injected, Spark Ignition Engine Combustion and Energy Transfer with Natural Gas, Gasoline, and Charge Dilution”, *SAE Int. J. Fuel Lubr.*, 15, 199-220, (2022).
- [10] 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).