

저발열량 천연가스가 엔진 성능 및 배기특성에 미치는 영향

이성원* · 임기훈** · 박철웅** · 최 영* · 김창기*

* 한국기계연구원, ** 과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공학과

Effect of Low Calorific Natural Gas on Performance and Emission Characteristics of Engine

Sungwon Lee*, Gihun Lim**, Cheolwoong Park**, Young Choi* and Changgi Kim*

* Korea Institute of Machinery and Materials,

** Dept. of Environment & Energy Mechanical Engineering, Univ. of Science and Technology,

(Received May 23, 2013 ; Revised September 4, 2013 ; Accepted October 5, 2013)

Key Words: Low Calorific Natural Gas(저발열량 천연가스), Compressed Natural Gas(천연가스), Thermal Efficiency(열효율), Emission(배기가스), Full-Load Performance, World Harmonized Steady State Cycle(정상상태 표준모드), World Harmonized Transient Cycle(과도응답상태 표준모드)

초록: 본 연구에서는 저발열량 천연가스가 현재 상용되고 있는 대형 천연가스 엔진에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 3종류의 연료를 적용하였다. 전부하 운전조건과 WHSC 및 WHTC 모드 테스트를 수행하여 엔진성능 및 배기특성을 분석하였다. 실험결과 전부하 실험에서 토크성능이 9,800kcal/Nm³의 발열량을 갖는 저발열량 가스의 경우 현행 천연가스(10,400kcal/Nm³)를 사용한 결과에 비해 4.4% 감소하였다. 저발열량 연료를 사용하였을 때 일산화탄소, 이산화탄소 및 질소산화물의 배출량은 감소하였지만, 탄화수소의 배출량은 증가하였다. WHSC 및 WHTC 실험결과 저발열량 연료에서 열효율이 증가하였으며 배기특성은 전부하 실험결과와 유사한 경향을 보였다. 저발열량 천연가스를 사용할 경우 제원상의 출력을 만족하기 어렵고, 탄화수소의 배출이 증가하는 문제점을 확인하였다.

Abstract: In this, three types of natural gas were employed to investigate the effect of low-calorific natural gas on the performance of and emissions from a heavy-duty CNG engine. The performance and emission characteristics were analyzed by conducting a full-load test, WHSC mode test, and WHTC mode test. The results showed that the torque of low-calorific natural gas with 9,800 kcal/Nm³ of higher heating value decreased by 4.4 compared to that of the current natural gas with 10,400 kcal/Nm³ of heating value. With low-calorific fuels, CO, CO₂, and NO_x emissions decreased. However, THC emissions increased. According to the WHSC and WHTC mode test results, the thermal efficiency increased and the emission characteristics showed a similar trend to the full-load test results. Low-calorific natural gases cause a decrease in torque at full-load operation conditions and an increase in hydrocarbon emissions.

1. 서론

화석연료의 유한성과 가격 상승 및 공급안정성의 악화로 에너지원의 다변화가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 특히 천연가스는 상대적으로 높은 매장량과 분포도로 가지고 있으며 최근에는 채굴기술이 발전함에 따라 셰일가스의

생산 및 공급량이 증가하고 있다. 이러한 이유로 공급안정성과 가격경쟁에서 우위를 보이고 있으며 운송수단 측면에서는 천연가스를 연료를 사용할 경우 가솔린엔진에 비하여 높은 열효율과 낮은 배기가스 배출하는 장점을 가지고 있다. 이에 따라 우리나라도 수송용 에너지 비율 측면에서 사용량이 매년 증가하고 있다. 시내버스 중 95%의 시내버스가 천연가스 버스로 대체되었으며 버스 및 트럭뿐만 아니라 천연가스 승용차도 계속 증가할 것으로 예상된다.⁽¹⁻³⁾

† Corresponding Author, cwpark@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

천연가스의 사용량이 증가함에 따라 경제적이고 안정적인 공급을 위하여 수입국의 다변화가 이루어지고 있다. 하지만 천연가스는 지역에 따라 조성이 상이하기 때문에 발열량의 변화가 예상되며 이러한 조성비변화에 의한 발열량 변화는 엔진성능 및 배기특성에 영향을 미칠 수 있다. 이에 따른 발열량 변화 효과 및 적용성에 대한 연구가 수행되어 왔으며 초기 연구결과는 엔진성능 구현과 산업용 엔진이 주 목표였지만 점차 수송용 대형 천연가스엔진의 성능, 배기특성 및 연비와 주행성능과 같은 차량성능에 관한 연구결과가 보고되고 있다. 연구결과를 살펴보면 발열량 저하에 따라 일산화탄소, 이산화탄소, 질소산화물의 배출 농도가 감소하며 점화시기 및 공연비가 일정할 경우 출력이 변동됨을 알 수 있었다. 또한 메탄가(Methane Number)가 증가하면 출력이 감소하고 탄화수소의 배출농도가 증가되는 실험결과가 보고되고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

국내에 보급되는 천연가스의 발열량도 세계적인 추세에 맞춰서 점차 감소할 것으로 예상되고 있으며 현재 이러한 영향으로 가격상징 기준을 부피에서 발열량으로 변경하여 판매되고 있다. 하지만 현재 운행되고 있는 천연가스 버스의 경우 상대적으로 높은 발열량을 기준으로 엔진의 운전 제어변수가 결정되어 있기 때문에 연료공급시스템과 엔진성능에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 저발열량 연료가 천연가스자동차용 엔진에 사용되었을 경우 연료의 성분 변화와 발열량 변

화에 따른 연료공급시스템 핵심부품을 포함한 엔진의 성능이 검증되어야 한다. 이에 본 연구에서는 저발열량 천연가스가 대형 천연가스엔진에 미치는 영향과 적용가능성 평가를 목적으로, 전부하성능과 WHSC(World harmonized steady state cycle) 및 WHTC(World harmonized transient cycle) 모드 테스트를 수행하여 성능 및 배기 특성을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 연료 조성 및 발열량

본 연구에서 사용한 저발열량 천연가스의 조성비율과 발열량, 밀도 등의 연료특성은 Table 1과 같다. 각 연료는 발열량을 기준으로 하여 1, 2, 3번 가스로 구분 하였다. 3번 가스는 작년까지 공급되었던 연료로써 발열량은 10,400 kcal/Nm³이며 현행 천연가스엔진의 ECU 맵핑은 3번 가스로 수행된 결과이다. 2번 가스는 가스공사에서 향후 공급할 예정인 10,100 kcal/Nm³의 발열량을 가진 연료이며, 3번 가스는 공급 하한값(9,800 kcal/Nm³)으로 예상되는 연료이다. 발열량이 감소할수록 메탄의 비율이 증가하며 이에 상응하여 밀도 및 H/C값도 증가하는 것을 알 수 있다.

2.2 실험장치

실험 대상 엔진은 시내버스용 대형 천연가스엔진이며 엔진 제원은 Table 2에 나타냈다. 엔진

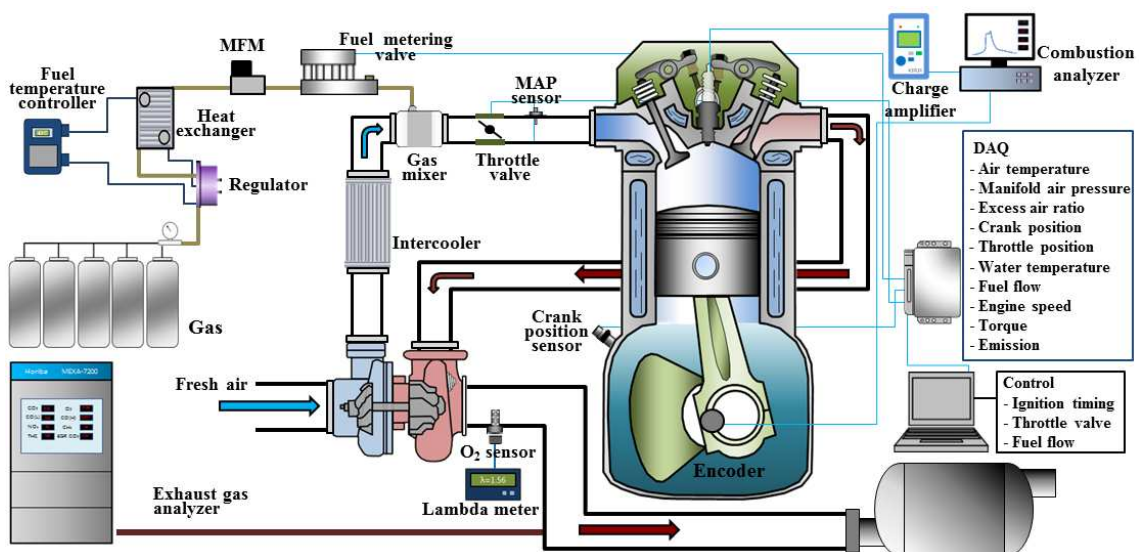


Fig. 1 Schematic of engine experimental setup

Table 1 Properties of fuel

Component	Gas #1	Gas #2	Gas #3
CH4	96.74%	93.07%	91.32%
C2H6	2.36%	4.49%	5.47%
C3H8	0.57%	1.53%	2.06%
i-C4H10	0.08%	0.33%	0.45%
n-C4H10	0.10%	0.36%	0.48%
i-C5H12	0.00%	0.02%	0.02%
n-C5H12	0.00%	0.00%	0.00%
N2	0.15%	0.20%	0.20%
Higher heating value [kcal/Nm ³]	9,800	10,100	10,400
Density [kg/Nm ³]	0.7423	0.7780	0.7952
Specific gravity	0.5741	0.6017	0.6150
H/C	3.92	3.82	3.78
(A/F) _{st}	16.998	16.879	16.831

의 부하 및 속도를 제어하기 위하여 AC동력계(Horiba co.)에 연계하여 설치하였으며 Fig. 1에 실험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 기존의 희박연소를 구현하는 연소시스템을 기반으로 하여 저발열량 천연가스의 공급 및 제어할 수 있는 시스템을 구성하였다.

저발열량 천연가스의 안정적인 연료공급을 위하여 80 MPa 정도로 충전된 고압연료용기 10개를 병렬로 매니폴드에 연결하여 실험을 수행하였다. 공급된 연료는 레귤레이터에서 0.7 MPa로 감압된 후 믹서를 통하여 흡기매니폴드 전단에 공급된다. 감압된 연료의 팽창에 의한 냉각을 막기 위해 열교환기(40℃ 유지)를 설치하였으며 연료유량은 가스분사기 8개가 하나의 모듈을 구성하는 Metering valve에 의해 공급량이 제어되고, MFM(Mass Flow Meter) 통하여 측정된다. EMS(Engine management system)를 구성하여 실험조건을 제어하였으며, 점화플러그형 압력 센서와 연소해석기(DEWETRON co.)를 통하여 연소 압력데이터를 측정하였다. 또한, 배기분석기(AVL co., AMA i60)을 사용하여 주요 배출가스인 일산화탄소, 이산화탄소, 탄화수소 및 질소산화물을 측정하였다.

Table 2 Engine specification

Number of cylinders	6 ea
Displaced volume	11.051 L
Bore	123 mm
Stroke	155 mm
Compression ratio	10.5:1
Max. power	222kW at 2100rpm
Max. torque	1150Nm at 1260rpm
Type of ignition	Spark ignition
Type of injection	Single point injection
Type of turbocharger	Waste gate

2.3 실험 방법 및 조건

2.3.1 전부하 특성 실험

저발열량 연료를 사용하였을 경우의 전부하 출력 성능 및 배기특성을 살펴보기 위하여 1000 rpm ~ 2100 rpm 범위에서 200 rpm 간격으로 스로틀이 전부 개방된 전부하 실험을 수행하였다. 엔진냉각수, 엔진오일(85.5±2.5℃) 및 흡기온도(40±2.5℃)가 충분히 예열된 상태에서 실험을 진행하였다.

2.3.2 모드 테스트

본 연구에서는 차량동력계가 아닌 엔진동력계에서 수행되어지는 모드 테스트로써 차기배기가스 규제인 EURO-6부터 적용될 시험모드인 WHSC 및 WHTC 모드 테스트를 진행하였다. 이는 엔진 실험단계에서 차량 운전 조건을 모사하여 엔진의 연소, 출력 성능 및 배기특성을 파악할 수 있는 실험방법이다.

본 연구의 동력계 제어 시스템은 모드 실험이 가능한 프로그램이 구성되어 있으며 절차와 방법에 준하여 실험을 수행하였다. WHSC 모드 테스트는 13가지 주요 운전조건에 대한 정상상태 운전조건을 실험으로써 각 운전조건별 속도와 부하 및 운전시간 이 결정되어 있으며, 총 실험시간은 1895초이다. 최초 실험은 모드9(중속 중부하)에서 10분간 예열한 후 아이들 상태에서 사이클이 진행되며 각 운전조건으로 변경을 위한 20초간의 램프구간을 포함하고 있다. WHTC 모드 테스트는 Cold WHTC 및 Hot WHTC 테스트가 존재하며 각 결과를 아래 식에 의해 가중 평균하여 산출하였다.

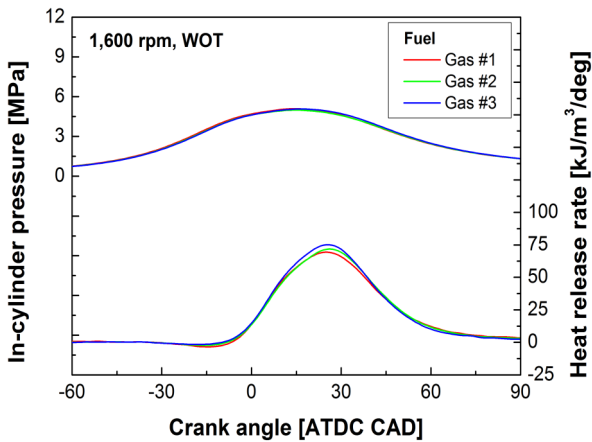


Fig. 2 In-cylinder pressure and heat release rate versus crank angle (1,600rpm, WOT)

$$e = \frac{(0.14 \times m_c) + (0.86 \times m_h)}{(0.14 \times W_{act,c}) + (0.86 \times W_{act,h})}$$

여기서;

m_c : cold WHTC 모드실험의 각 오염물질별 배출질량(g/test)

m_h : hot WHTC 모드실험의 각 오염물질별 배출질량(g/test)

$W_{act,c}$: cold WHTC 모드실험의 실제 사이클 작업일(kWh)

$W_{act,h}$: hot WHTC 모드실험의 실제 사이클 작업일(kWh)

Cold WHTC 테스트는 엔진 냉각수 및 오일 온도가 20~30°C 내에 있을 때 실험을 시작하며 엔진시동과 동시에 사이클이 진행된다. cold WHTC 테스트가 종료된 후 10±1분간 엔진을 정지하여 소킹한 후 hot WHTC 테스트를 수행하였다. 이때의 셀 내부의 온도와 습도는 환온환습 시스템을 이용하여 25°C, 50%로 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과

3.1 전부하 특성 실험

3.1.1 연소특성

Fig. 2는 각 연료의 실린더내 연소압력과 열방출률을 크랭크각도에 따라 보여주고 있다. 모든 운전조건의 실험결과를 나타낼 경우 구분의 어려움이 있기 때문에 대표적으로 1600rpm에서의 결

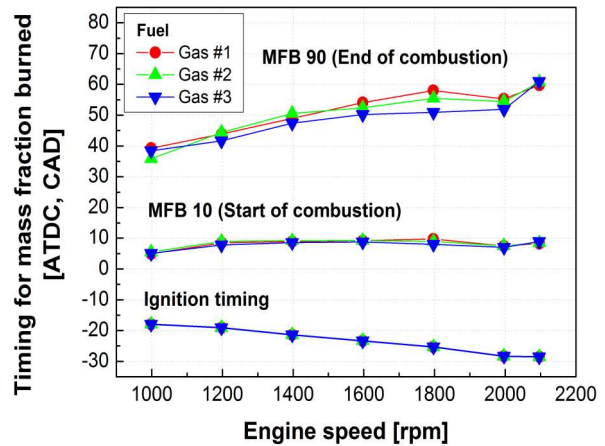


Fig. 3 Spark ignition timing and Mass Fraction Burned (MFB) 10% and 90% results versus engine speed

과만 나타내었으며, 다른 운전조건의 경우에도 비슷한 경향을 보였다. 발열량이 낮은 1, 2번 가스가 3번 가스에 비하여 연소압력이 소폭 낮아지고 지각되는 경향을 볼 수 있으나 큰 차이는 보이지 않았다. 열방출률을 경우에도 발열량이 낮을수록 최대값이 낮아지고 위상이 지각되는 경향을 볼 수 있었다.

Fig.3은 엔진의 속도 변화에 따른 각 연료의 연소기간을 보여주고 있다. 연소기간을 정하는 방법으로 MFB(Mass Fraction Burned)를 나타내었다. 이는 실린더내의 연료가 얼마나 연소하였는지 나타내는 값으로써 일반적으로 점화시기부터 MFB 10% 까지는 점화지연 기간, 10%에서 90%까지의 기간을 연소기간으로 정의할 수 있다.⁽⁸⁾ 운전조건에 따라 소폭 차이는 있으나 발열량이 낮을수록 점화지연이 길어지고 연소기간이 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 그러나 상대적으로 차이가 크지 않기 때문에 연소위상과 연소기간 차이에 따른 연소 및 엔진성능에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

3.1.2 엔진성능 특성

Fig. 4는 각 연료의 토크성능을 엔진속도에 따라 보여주고 있다. 저발열량 연료를 사용하였을 경우 토크성능이 전 운전영역에서 감소하는 경향을 보이고 있다. 3번 가스대비 발열량이 5.9% 낮은 1번 가스는 토크성능이 평균 4.4% 감소하였으며, 발열량이 2.9% 낮은 2번 가스의 경우는 토크성능이 3.8% 감소하였다. 본 연구의 대상엔진은 터보차저가 장착된 엔진으로써 일정한 운전조건

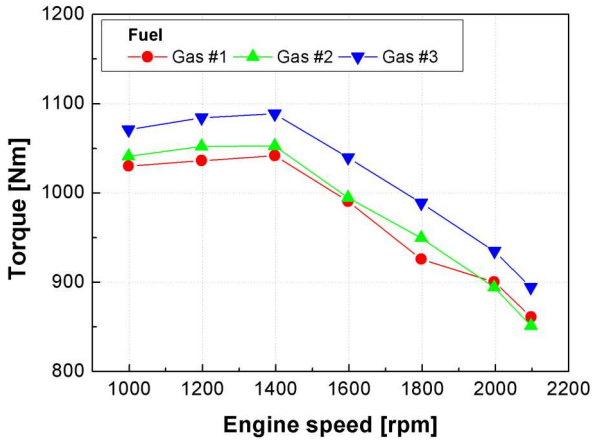


Fig. 4 Torque curve versus engine speed

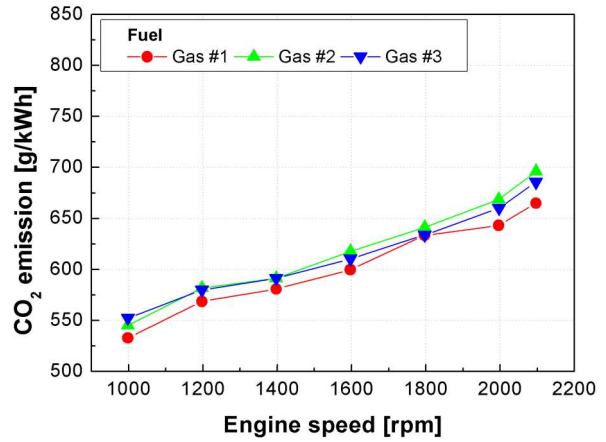


Fig. 6 CO2 emission versus engine speed

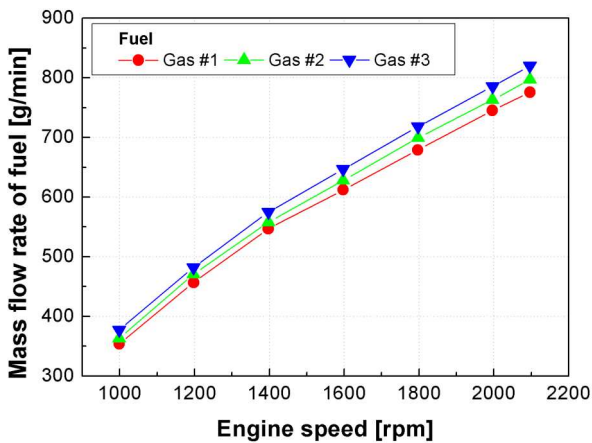


Fig. 5 Mass flow rate versus engine speed

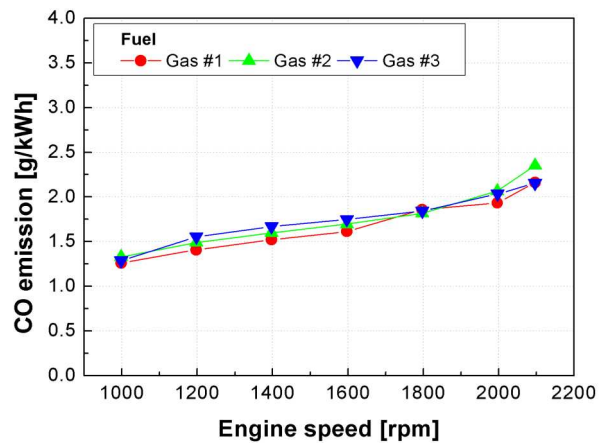


Fig. 7 CO emission versus engine speed

에서의 출력을 과급압력과 공연비를 제어하여 만족하는 방법을 취하고 있다. 각각의 엔진속도 조건에서 유사한 수준의 공연비와 체적유량을 보이며 과급압력이 유지되었기 때문에 공급된 천연가스 연료의 체적유량은 일정하다고 볼 수 있으나, 체적당 발열량이 낮기 때문에 저발열량 연료의 경우 토크가 감소한 것으로 보인다.

Fig. 5와 같이 질량유량을 살펴보면 발열량이 감소한 1,2번 가스의 질량유량이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 밀도에 의한 영향으로 볼 수 있으며 Table 1에 나타낸 것과 같이 저발열량의 가스의 경우 상대적으로 무거운 비메탄 탄화수소의 감소로 인하여 밀도가 감소했기 때문이다.

이러한 질량유량 감소는 연료소비율 및 열효율에 영향을 줄 수 있으나, 토크가 동등한 수준이 아니기 때문에 비교가 명확하지 않다. 따라서 토크가 제어되는 모드실험을 통한 열효율 분석이

보다 적절하다. 성능의 기준으로 볼 수 있는 토크의 감소가 제원상의 기준인 3%를 초과하기 때문에 저발열량 가스를 적용할 경우 제원을 만족하지 못함을 알 수 있다.

3.1.3 배출가스 특성

Fig. 6은 이산화탄소의 배출량을 엔진속도에 따라 보여주고 있다. 발열량이 낮을수록 소폭 감소하는 경향을 볼 수 있었으며 3번 가스 대비 2번 가스는 동등한 수준을 보이지만 1번 가스의 경우 평균 2.1% 감소하였다. 이산화탄소 배출량은 연료소비량과 연료의 탄소성분에 영향을 크게 받는다. 1번 가스의 경우 H/C값이 조성3번 대비 5% 증가하여 이산화탄소 배출량이 감소한 것으로 판단된다. 일산화탄소 배출량이 역시 이산화탄소의 배출량과 유사한 결과를 보였으며 Fig.7에 결과를 나타내었다. 발열량이 가장 낮은 1번 가스의 경우 감소된 H/C값의 영향으로 3번 가스 대비

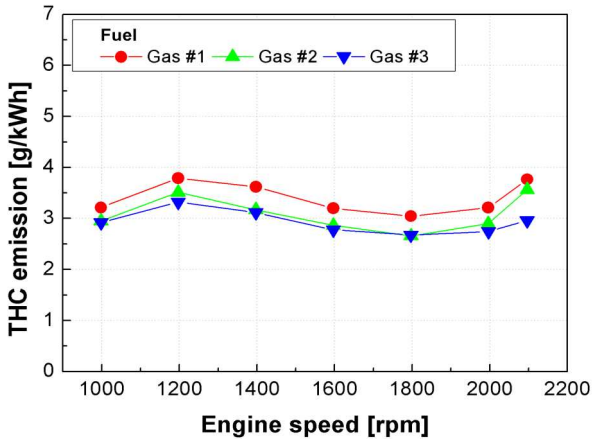


Fig. 8 THC emission versus engine speed

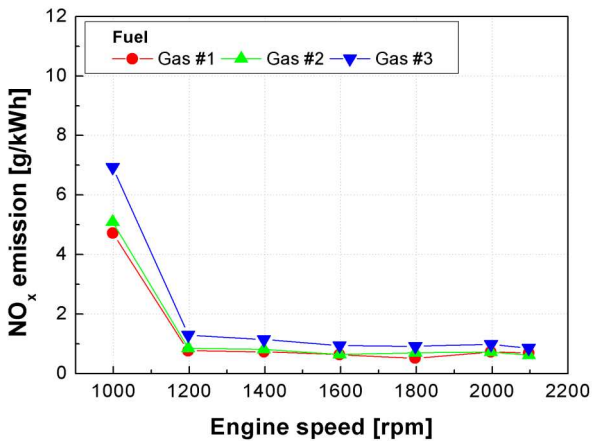


Fig. 9 NOx emission versus engine speed

4.5% 일산화탄소 배출량이 감소하였다. 일산화탄소의 경우 그 양이 전체적으로 낮은 수준이며 산화촉매를 이용하여 95%이상 저감이 가능한 반면, 이산화탄소의 배출은 온실가스 감축 규제에 영향을 받기 때문에 저발열량 가스의 사용에 의한 이산화탄소 저감은 긍정적인 결과로 볼 수 있다.

Fig. 8는 탄화수소 배출량을 보여주고 있으며 저발열량의 연료를 사용하였을 때 증가하는 경향을 보이고 있다. 3번 가스 대비 1, 2번 가스는 각각 16.3%, 5.3% 증가하였으며 이는 연료 중 메탄 함유량에 영향을 받은 것으로 판단된다. 메탄은 매우 안정한 상태의 분자구조를 갖는 연료로서 수소원자와 탄소원자의 분리가 어렵기 때문에 함유량이 증가하면 배출량이 증가하게 된다. 따라서 메탄함유량이 높은 1번 가스의 탄화수소 배출량이 크게 증가한 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 질소산화물 배출량을 보여주고 있다. 1,000 rpm 조건에서는 연료에 관계없이 질소산화

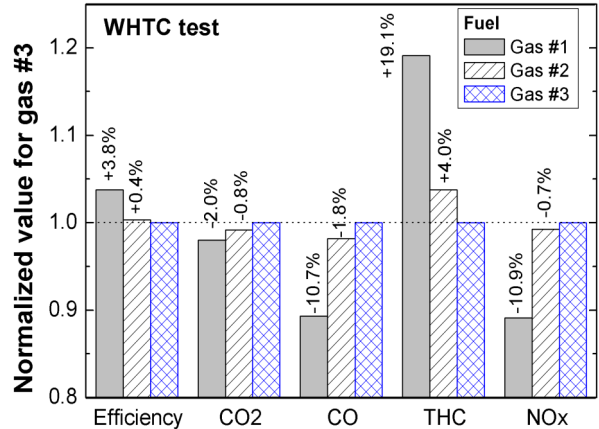


Fig. 10 Normalized values of thermal efficiency and emission for WHSC mode result

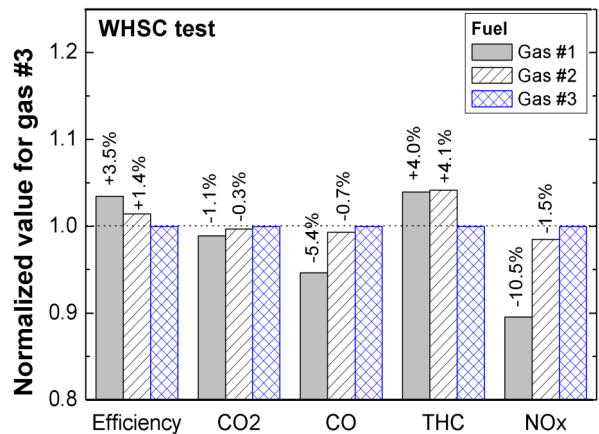


Fig. 11 Normalized values of thermal efficiency and emission for WHSC mode result

물의 배출이 다른 운전조건에 비해 높게 나타났으며, 저발열량의 연료를 사용하였을 때 감소하는 경향을 보이고 있다. 저속 전부하 운전조건인 경우 배출가스 특성보다는 출력에 맞추어 운전이 되기 때문에 상대적으로 농후한 혼합기를 이용하여 점화시기 또한 진각되어 있기 때문에 질소산화물의 배출량이 높은 것으로 판단된다. 3번 가스 대비 1, 2번 가스의 감소율은 각각 평균 32.8%, 28.3%이며 이러한 배출량 저감효과는 연소온도 감소에 의한 것으로 사료된다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 메탄의 단일화염온도가 상대적으로 낮기 때문에 메탄함유량이 높은 저발열량 연료의 경우 열방출률의 최대값이 낮고 지각되는 것을 알 수 있다. 이러한 영향에 의해 연소온도가 감소하여 질소산화물의 배출량이 감소한 것으로 판단된다.

3.2 모드 테스트 결과

Fig. 10은 WHSC 모드 실험 결과를 3번 가스를 기준으로 열효율과 배출가스에 대해서 각 연료별로 정규화한 것이다. 저발열량 1, 2번 가스연료를 사용하였을 때 열효율이 각각 3.5%, 1.4% 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 기술한 밀도에 의한 질량유량 감소의 영향임을 알 수 있다. 배출가스의 경우 전부하 운전조건 실험 결과와 동일한 경향을 보이고 있다. 이산화탄소와 일산화탄소 및 질소산화물의 배출량은 감소하지만 탄화수소의 배출량은 증가하는 것을 볼 수 있다.

차량의 운전패턴을 모사한 WHTC모드 실험 결과는 Fig. 11에 도시하였으며 전체적으로 WHSC와 유사한 경향을 보이고 있으나 그 절대값과 증감률의 폭이 상대적으로 크게 나타났다. 이는 급격한 엔진 토크 및 속도 변화로 인한 연소 및 배출가스 변화와 냉간운전 조건인 Cold WHTC 테스트의 영향으로 판단된다. 냉간운전 시 상대적으로 농후한 운전조건으로 운전되도록 제어변수가 설정되어 있기 때문에 배기가스에 영향을 미칠 수 있다. 실험결과를 전체적으로 살펴보면 WHSC와 마찬가지로 저발열량 연료를 사용할 경우 이산화탄소와 일산화탄소 및 질소산화물의 배출량은 감소하지만 탄화수소의 배출량은 증가하였다. 효율은 증가한 반면 탄화수소 배출물의 증가폭이 크기 때문에 메탄의 규제가 강화되는 차기규제(EURO-6) 만족을 위해서는 산화촉매의 보완이 필수적일 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 저발열량 천연가스가 대형 CNG 엔진에 미치는 영향과 적용가능성 평가를 목적으로, 전부하성능, WHSC, WHTC 실험을 수행하여 연소 및 배기 성능을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 연소위상이 감소하는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않았으며 연소기간도 뚜렷한 변화를 보이지 않았으나, 전부하 출력은 현행 천연가스 적용 시 대비 저발열량 가스의 경우 3% 이상 감소하였다.

(2) 저발열량 가스의 경우 H/C값 증가의 영향으로 일산화탄소, 이산화탄소의 배출량이 감소하였으며, 연소온도가 낮아지고 열방출률이 저감됨에 따라 질소산화물의 배출량이 감소하였다.

(3) 메탄 함유량 증가로 인하여 탄화수소의 배출량이 저발열량 연료에서 높게 나타났으며, 냉간운전 조건을 포함하는 WHTC 모드 실험결과 큰 폭으로 증가하였다.

(4) 저발열량 천연가스를 사용할 경우 제원상의 출력성능을 만족하지 못하고 탄화수소의 배출이 크게 증가하기 때문에 차기 배출가스 규제의 만족을 위해서는 산화촉매의 보완이 필수적이다.

참고문헌

- (1) Jahirul, M. I., Masjuck, H. H., Saidur, R., Kalam, M. A., Jayed, M. H. and Wazed, M. A., 2010, "Comparative Engine Performance and Emission Analysis of CNG and Gasoline in a Retrofitted Car Engine," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 14-15, pp.2219~2225.
- (2) Romm, J., 2006, "The Car and Fuel of the Future," *Energy Policy*, Vol. 34, pp. 2609~2614.
- (3) Kim, C. U., Kim, C. G., Kim, S. S., Pang, H. S., Han, J. O. and Cho, Y. S., 1996, "A Study on the Performance Improvement for a Natural Gas Engine under Lean Burn & WOT Condition," *Transaction KSAE*, Vol. 4, No. 6, pp. 11~17.
- (4) Lee, Y. J. and Kim, G. C., 1999, "Effect of Gas Compositions on Fuel Economy and Exhaust Emissions of Natural Gas Vehicles," *Transaction KSAE*, Vol. 7, No. 8, pp. 123~131.
- (5) Feist, M. D., 2010, "The Effect of fuel Composition on Performance and Emissions of a Variety of Natural Gas Engine," *SAE Int. j. Fuels Lubr.*, Vol. 3, No. 2, pp. 100~117
- (6) Min, B. H., Bang, K. H., Kim, H. Y., Chung, J. T. and Park S. S., 1998, "Effects of Gas Composition on the Performance and Hydrocarbon Emissions for CNG Engines," *SAE Technical Paper* 981918.
- (7) Ha, Y. C., Lee, S. M., Kim, B. G. and Lee, C. J., 2011, "Performance and Emission Characteristics of a CNG Engine Under Different Natural Gas Compositions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37 No. 7, pp. 749~755.
- (8) Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, MCGraw-Hill,