



저열량 가스 적용에 따른 천연가스엔진의 대응 방안 연구

박철웅 · †김창기 · 오세철 · 이장희

한국기계연구원 그린동력연구실

(2021년 3월 30일 접수, 2021년 4월 21일 수정, 2021년 4월 22일 채택)

Countermeasures to the Introduction of Low Caloric Gas Fuel for Natural Gas Engine

Cheol-Woong Park · †Chang-gi Kim · Se-Chul Oh · Jang-Hee Lee

Engine Research Team, Korea Institute of Machinery and Materials,
Daejeon 34103, Korea

(Received March 30, 2021; Revised April 21, 2021; Accepted April 22, 2021)

요약

국내에서 사용되는 천연가스가 저열량화 되면서 발생할 수 있는 문제점에 대응하기 위해서는 국내 산업용 가스기에 미칠 수 있는 문제점을 사전에 파악하고, 이를 기반으로 에너지의 효율적인 사용을 위한 대응 방안이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 EURO-6 규제를 대응하는 희박연소방식의 천연가스 엔진을 이용할 경우, 저열량 가스의 도입으로 인한 엔진 출력성과 효율의 저하 문제를 해결하기 위해, 실험을 토대로 한 구체적인 제어방안과 결과를 제시하고자 하였다. 전부하 운전조건인 1,400 rpm의 엔진 회전수에서 스로틀이 전부 개방된 전부하 조건과 정격운전조건인 엔진회전수인 2,100 rpm, 450 Nm의 토크 조건에서 점화시기로 대표되는 제어변수에 의한 개선효과 확인을 위해, 각 가스연료에 대해서 점화시기를 변경하여 열효율 및 배출 가스특성을 파악하고 최적화하였다. 전부하조건에서 토크를 기준으로 가장 낮은 값을 보이는 순수메탄의 경우 기준 조건에서 약 2 CAD 정도 점화시기를 전각하면 NOx 배출의 큰 증가 없이 토크를 보상할 수 있다.

Abstract - In order to cope with the problems that may occur when the natural gas used in Korea becomes low in calories, the problems that may have to the domestic industrial gas equipment must be identified in advance, and based on this, countermeasures for efficient use of energy must be preceded. In this study, in order to solve the problem of deterioration of engine output performance and efficiency due to the introduction of low calorific gas when using a lean-burning natural gas engine that complies with the EURO-6 regulation, specific control plans and results based on the experiment are intended to be presented. In order to identify the improvement effect by the control variable represented by the ignition timing under the full load condition at the engine speed of 1,400 rpm and 550 Nm, 2,100 rpm, which is the engine speed at the rated operation condition, the thermal efficiency and exhaust gas characteristics were identified and optimized by changing the ignition timing for each gas fuel. In the case of pure methane, which shows the lowest value based on the torque under the full load condition, if the ignition timing is advanced by about 2 CAD from the reference ignition timing, the torque can be compensated without a large increase in NOx emission.

Key words : low caloric gas, natural gas engine, countermeasures, torque, ignition timing

†Corresponding author:cgkim@kimm.re.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

세계적으로 열량이 높은 성분의 천연가스의 생산 및 도입은 줄어드는 반면에 저열량의 천연가스가 늘어나는 추세이다. 이에 발 맞추어 국내에서도 이미 수 년전부터 천연가스의 열량 범위제가 시행되고 있으며, 최근에는 러시아로부터 저열량가스인 파이프라인 가스의 도입이 검토되고 있다. 이에 따라 향후 국내에 보급되는 천연가스는 지금보다 더 저열량화 될 가능성이 있다. 이렇게 도입되어 국내에서 사용되는 천연가스가 저열량화 되면서 발생할 수 있는 문제점에 대응하기 위해서는 국내 산업용 가스기기에 미칠 수 있는 문제점을 사전에 파악하고, 이를 기반으로 에너지의 효율적인 사용을 위한 대응 방안이 선행되어야 한다.

국내 산업용 가스기기로서 천연가스 엔진은 시내버스, 열병합발전용시스템 및 가스히트펌프의 동력원으로 사용되고 있으며, 그 중 시내버스용 천연가스 엔진은 2000년 초부터 운행이 시작된 이래 현재 약 3만여 대가 보급되어 운행 중에 있다. 대부분 국내 업체에서 생산된 엔진을 이용하고 있으며, 차량 배출가스 규제의 변화에 따라 연소방식을 변경하여 적용하는 등의 제어방식 차이로 인해 천연가스 성분 변화에 대한 영향과 이에 대한 대응방법은 달라질 수 있다.

한국가스공사[1]에서 열량범위제도의 도입을 위한 사전 영향성 평가의 일환으로 진행한 용역연구에 따르면, 공연비제어가 이루어지는 6리터급의 열병합발전용 천연가스 엔진에서 열량범위제의 최저 열량에 해당하는 $9,800 \text{ kcal/m}^3$ 의 발열량을 갖는 천연가스가 공급될 경우 출력은 3.2% 감소하고, 효율은 1.1% 감소하는 것으로 나타났다. Min 등[2]은 1.5리터급 가솔린엔진을 천연가스 적용이 가능하도록 개조하여 천연가스 연료의 성분 변화에 따른 엔진 성능 및 배출가스 영향을 보고한 바 있다. 연료의 성분에 따라 결정되는 지수인 Maximum combustion potential 값의 증가에 따라 미연탄화수소의 배출은 감소하고 질소산화물(NO_x)의 배출은 증가하였다. 천연가스 연료를 기준으로 점화시기와 공연비를 고정하고 공급되는 천연가스의 조성이 변할 경우 출력이 최대 20%까지 변하는 결과를 보고하였다.

미국의 Caterpillar 사[3]에서는 생산지역과 방식이 다른 여러 가지 성분의 천연가스에 대해 발열량과 공연비 등의 연소 제어에 필요한 물성치를 분석하여 비교하였으며, 각각의 연료를 천연가스 엔진의 과급 유무에 따라 적용하기 위한 전략을 제시하였다. 천연가스 연료의 노킹 특성을 나타내는 지수로서 Methane number를 제시하고, 엔진의 부하, 흡입공기 온도 및

공연비 등과의 상관관계를 검토함으로써 각각의 가스의 엔진 적용성을 평가하였다.

지금까지의 연구결과들을 요약하여 살펴보면, $9,800 \text{ kcal/m}^3$ 수준으로 낮은 발열량을 갖는 천연가스를 사용하면 엔진의 배출가스 수준이 규제를 벗어날 정도로 악영향을 미치지 않는으나, 출력 및 효율의 저하가 필수적으로 동반됨을 확인하였다[4,5]. 그러나 상기의 연구결과는 EURO-5 규제를 대응하는 희박연소 엔진과 EURO-6 규제를 대응하는 이론공연비연소 엔진을 대상으로 한 것으로서 최신의 규제를 대응하는 희박연소 엔진에 대한 대응방안 연구는 보고되지 않았다. 국내의 열량범위제의 범위 안에 있는 천연가스 성분 변화에 대해서는 엔진 출력성능 및 효율 저하의 폭이 우려할 수준은 아니지만, 러시아의 저열량 가스가 도입될 경우 그 폭이 더 커질 수밖에 없다. 이에 따라 향후 발생 가능한 성능 및 배출가스 악화로 인한 사용자의 불만과 불이익을 해소하기 위해, 보다 많은 연구결과에 대한 조사와 추가시험을 바탕으로 구체적인 영향의 범위와 적절한 대응 방안이 제시되어야 할 것으로 생각된다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 EURO-6 규제를 대응하는 희박연소방식의 천연가스 엔진을 이용할 경우, 저열량 가스의 도입으로 인한 엔진 출력성능과 효율의 저하 문제를 해결하기 위해, 실험을 토대로 한 구체적인 제어방안과 결과를 제시하고자 하였다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에서는 Table 1에서 확인할 수 있는 것과 같이 EURO-6 규제를 대응하는 11리터급 희박연소방식의 천연가스 엔진을 이용하여 천연가스 성분 변화에 대한 실험을 진행하였다. 저발열량 가스가 엔진의 성능 및 배기가스에 미치는 영향과 대응 방안을 검토하기 위해 기존의 천연가스 연료에 질소를 혼합하여 저발열량 모사가스를 엔진에 공급하였고, 질소를 4% 혼합한 가스에 비해 발열량은 낮지만 웨버지수는 높은 순수 메탄을 공급하여 비교 실험하였다. 저발열량 가스 모사를 위한 질소와 순수메탄의 경우 12 MPa 정도로 충전된 고압용기로부터 레귤레이터에서 0.8 MPa로 감압된 연료가 Fuel Metering valve(연료분사기모듈)로 공급되도록 했다. 이때 레귤레이터에서 감압된 연료의 팽창에 의한 연료라인의 과도한 냉각을 막기 위해 열교환기와 40도 수준의 온수를 지속적으로 공급하여 온도를 유지하는 closed recirculating heater를 구비하여 엔진에 공급되는 연료의 온도를 일정하게 제어했다. 저발열량 가스의 모사를 위해 희석용으로

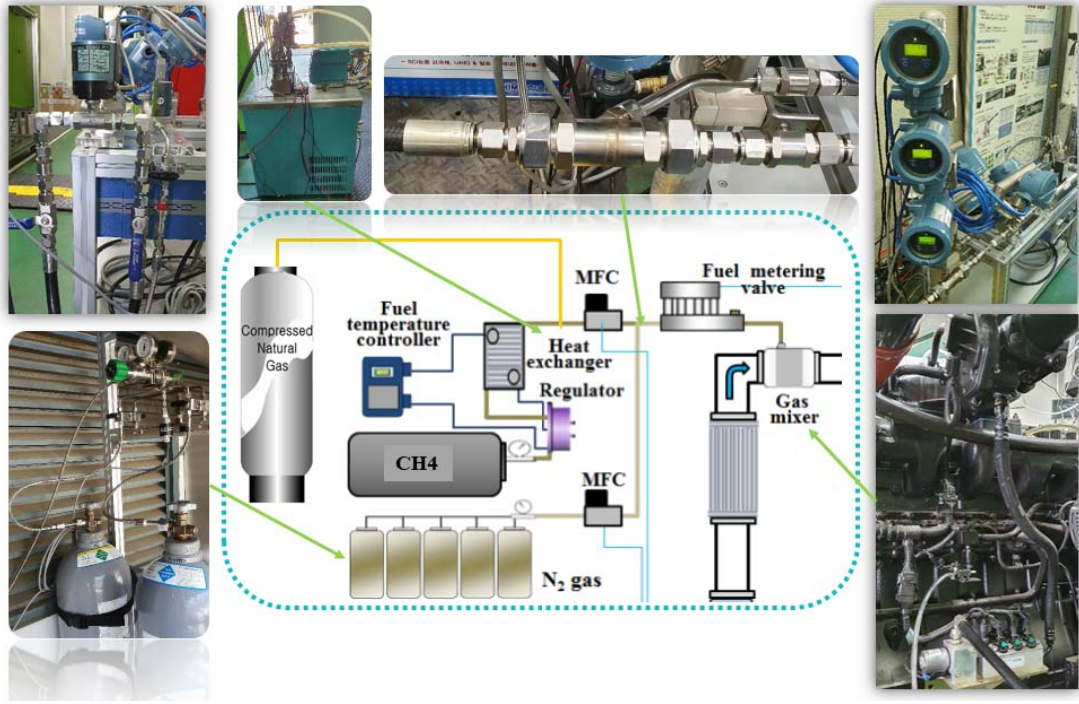


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup for low calorific natural gas and pure methane fuel supply to lean-burn natural gas engine

사용되는 질소는 사용 유량이 많지 않기 때문에 2개의 고압질소가스용기를 병렬로 연결하고 y자 형상으로 기존의 천연가스 연료라인에 연결하여 공급했다. 실험에 사용된 저발열량 모사 천연가스 및 순수메탄(CH₄)의 공급을 위한 장치 개략도 및 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

이때 원하는 만큼의 질소가 충분히 공급 및 제어될 수 있도록 기준연료의 레귤레이터 이후 감압 압력보다 높은 약 1.2 MPa로 공급되도록 하고, 순수 메탄의 경우 전부하 운전조건에서 기준연료를 충분히 대체하여 공급될 수 있도록 10개의 고압메탄가스용기를 병렬로 연결하고 레귤레이터를 지나면서 감압된 이후 3-way 밸브의 전환을 통해 대체 공급될 수 있도록 했다. 최종적으로 소모되는 가스연료는 Engine control unit에 의해 제어되는 Fuel metering valve에 의해서 공연비에 맞게 조절이 되기 때문에 실시간으로 저발열량 가스를 모사할 수 있도록 MFC를 이용하여 운전조건에 맞게 계속해서 질소의 유량을 제어하고 유량의 측정은 Coriolis 방식의 Mass flowmeter (Micromotion, CMF025m)를 이용하여 측정하였다. 천연가스 및 메탄가스의 유량 측정은 3-way 밸브의

Table 1. Specifications of engine

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

하류에 위치한 연료유량 측정용 Mass flowmeter를 공통으로 이용하여 측정기간에 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다.

배기관에 장착된 산소센서의 값을 실시간으로 모니터링하여 천연가스 연료유량을 제어함으로써 운전

조건별로 목표로 하고 있는 공연비가 제어되도록 했으며, 배기관으로부터 샘플된 배출가스를 배기가스 측정 장비(AVL, AMA i60R1)를 통해 분석하여 NOx 값을 제시하였다. 와류 동력계(Schenck co., WT470)을 이용하여 엔진의 회전수 및 부하를 제어함으로써 정상상태 운전조건에서 실험을 진행하였다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 가스연료는 발열량을 기준으로 선정되었으며 천연가스는 산지에 따라 조성이 다르기 때문에, 천연가스의 특성을 구분하는 여러 가지 지수도 차이를 나타낸다. Table 1에 본 연구에서 사용한 시험용 천연가스 연료의 조성 및 물성치를 나타내었다. 현재 국내에 한국가스공사에서 공급하고 있는 천연가스(100% NG)를 기준으로 저발열량 가스의 영향을 살펴보기 위해, 기준 천연가스 연료에 질소를 각각 4%, 8% 혼합하여 저발열량 가스(4% N2, 8% N2)를 모사하였다. 질소 혼합에 따른 저발열량 모사가스의 경우 질소를 제외한 천연가스의 주성분인 메탄, 에탄, 및 프로판 등과 같은 탄화수소계 성분은 일정하기 때문에, 천연가스 성분의 변화에 따른 발열량 저하의 영향을 동시에 검토하기 위해 CH4을 연료로서 사용하여 비교하고자 하였다.

저발열량 가스연료를 사용한 경우의 효율 및 배출가스 특성을 살펴보고, 성능 최적화 및 유해배기가스 배출량 저감을 위한 대응방안 도출을 위해 대표적인 전부하 운전조건인 1,400 rpm의 엔진 회전수에서 스로틀이 전부 개방된 전부하 조건에서 실험을 진행하였다. 각 가스연료에 대해서 점화시기를 변경하여 열효율 및 배출가스특성을 파악하고 최적화하였다. 점화시기로 대표되는 제어변수에 의한 고속 부분부하 조건에서의 개선효과 확인을 위해 정격운전조건인 엔진회전수인 2,100 rpm, 450 Nm의 토크를 유지하며 실험을 수행하였다. 실험조건을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 각 운전조건에서 기준 엔진에서 설정된 공연비와 과급압력을 유지하는 조건에서 운전되도록 하였고, 엔진의 냉각수 온도(80±2.5℃)가 충분히 가열된 상태에서 실험을 진행하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 전부하 운전조건에서의 토크 보상

Fig.2는 1,400 rpm 전부하 운전조건에서 천연가스 연료의 조성이 토크에 미치는 영향 및 점화시기에 따른 토크 변화를 관찰한 결과이다. 기준연료에 대해서 가장 높은 값의 토크를 보이고 질소의 혼합비율이 증가할수록 토크가 감소하였다. 연소속도에 의한 영향

으로 순수메탄의 경우 가장 낮은 토크 결과를 보였다 [7]. 공연비($\lambda=1.55$)와 흡기메니폴드 압력(188 kPa) 등의 제어변수는 기준연료를 사용한 경우와 동일하게 유지하였다. 기준연료인 천연가스(100% NG)의 경우를 살펴보면 희박연소를 적용한 가스엔진에서 최대토크를 나타내는 Maximum brake torque(MBT) 점

Table 2. Composition and properties of natural gas fuels for composition variation tests

	Natural gas (100% NG)	Low calorific gas I (4% N2)	Low calorific gas II (8%N2)	Pure methane (CH4)
CH ₄	92.93	89.29	85.64	100
C ₂ H ₆	5.34	5.13	4.92	0
C ₃ H ₈	1.07	1.03	0.98	0
i-C ₄ H ₁₀	0.22	0.21	0.20	0
n-C ₄ H ₁₀	0.28	0.27	0.26	0
i-C ₅ H ₁₂	0.01	0.01	0.01	0
n-C ₅ H ₁₂	0	0	0	0
N ₂	0.15	4.06	7.98	0
Specific gravity	0.599	0.613	0.628	0.557
Higher heating value (kcal/Nm ³)	10,123	9,726	9,329	9,526
Wobbe Index (kcal/Nm ³)	13,084	12,421	11,866	12,746

Table 3. Experimental conditions

Engine speed / load	1,400 rpm / 1,150 Nm	2,100 rpm / 450 Nm
Equivalence ratio	0.648	0.666
Intake manifold pressure	0.188 MPa	0.097 MPa
Base ignition timing	BTDC 21.8 CAD	BTDC 29.9 CAD
Throttle opening	100%	45.5%

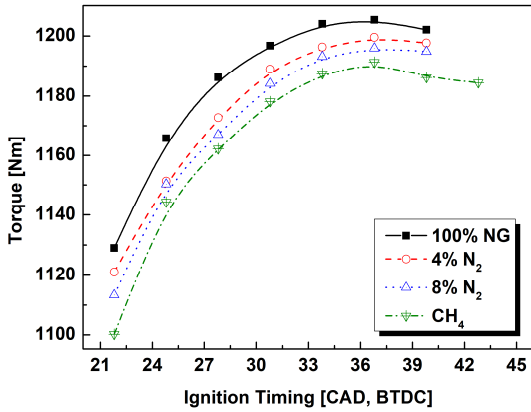


Fig. 2. Torque variations for each gas composition with ignition timing under 1,400 rpm full load operating conditions.

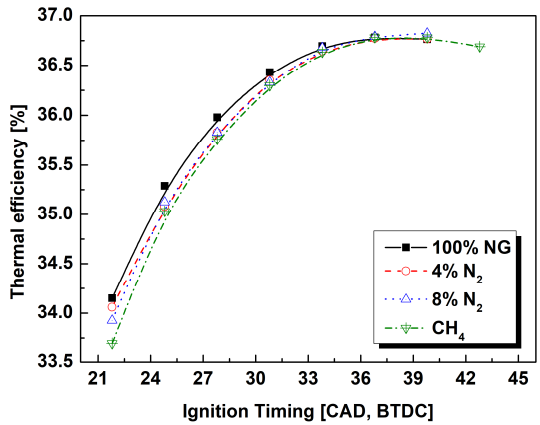


Fig. 3. Thermal efficiency variations for each gas composition with ignition timing under 1,400 rpm full load operating conditions.

화시기는 Before top dead center(BTDC) 37 crank angle degree (CAD) 부근으로 나타나지만, NOx 배출량을 규제치 이하로 맞추기 위해 BTDC 22 CAD 부근으로 지각되어 있음을 알 수 있다.

Fig.3은 Fig.2와 동일한 조건에서 열효율을 계산하여 도시한 그래프이다. 조성이 다른 가스에 대해서도 MBT 점화시기는 BTDC 37 CAD 부근으로 나타나지만, 질소의 비율이 증가할수록 MBT 점화시기가 진각되는 것을 확인할 수 있다. 질소의 비율이 증가할수록 연소속도가 감소하는 것을 보여주는 결과이며, 연소속도가 가장 느린 순수메탄의 경우 MBT 점화시기가 가장 진각되었다[7]. 공연비와 흡기 매니폴드 압력이 일정할 때 MBT 점화시기에서 최대 열효율은 가스성분에 관계없이 비슷한 수준을 보였다.

비슷한 수준의 최대 열효율과는 달리 MBT 점화시기 조건이라 하더라도 질소의 비율이 증가할수록 최대토크 값은 감소하였고 순수메탄의 경우 가장 낮은 토크값을 보였다. 점화시기 변경을 통해서도 성능을 나타내는 최대 토크 값은 회복되지 않았는데, 이것은 일정한 흡기 매니폴드 압력 분위기에서 공급되는 연료의 총발열량이 질소의 비율이 높아지거나 순수메탄을 사용할 때 감소하기 때문이다. 가스연료의 종류에 관계없이 일정한 흡기 매니폴드 압력은 시간에 따른 혼합기 공급량이 동일함을 의미하는데, 질소의 혼합에 따라 혼합기 내에 연료 및 공기의 양이 감소하기 때문에 기준연료인 천연가스(100% NG) 대비 공급되는 총발열량이 감소하여 동일한 수준의 효율에서도 토크값이 감소하였다. 순수메탄을 사용한 경우 혼합기 내에 불활성 가스인 질소가 포함되지는 않았지만, 연료 자체의 발열량이 낮고 밀도가 약 7% 정도 감소

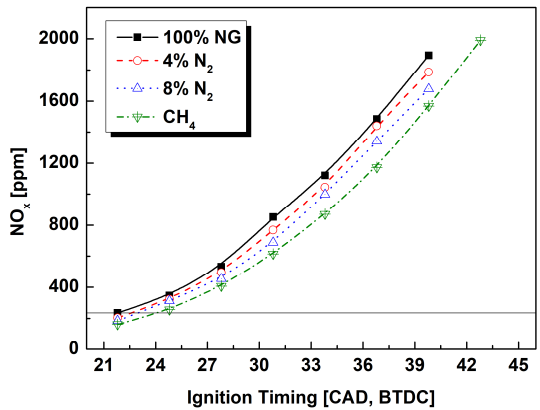


Fig. 4. NOx variations for each gas composition with ignition timing under 1,400 rpm full load operating conditions.

한 것이 지배적인 원인으로 작용하였다.

앞서 언급한 바와 같이 NOx 배출 규제를 만족하기 위해서는 MBT 점화시기 보다 많이 지각된 조건에서 운전되어야 하고, 지각된 점화시기 조건에서의 성능 지표인 토크값은 5% 이상 감소됨을 알 수 있다. 발열량이 낮은 조성의 천연가스를 사용하게 되면 추가적으로 토크가 감소(기준천연가스(100%NG) 대비 28 Nm 감소)하게 되고, Fig.2에서 확인할 수 있는 것과 같이 지각된 점화시기 조건에서의 토크 감소폭(37 Nm 감소 / 3 CAD 지각)은 MBT 점화시기 조건에 비해(3 Nm 감소 / 3 CAD 지각) 크다. 따라서 성능악화로 인

한 사용자의 불편을 방지하기 위해 점화시기의 진각을 통한 토크 보상이 필요하다. 그러나 점화시기의 진각은 NO_x의 증가를 동반하기 때문에 NO_x 배출값을 고려한 보상 가능성이 검토되어야 한다.

Fig. 4는 Fig.2와 동일한 조건에서 NO_x의 배출을 측정 한 값이다. Fig. 2의 토크 결과와 유사하게 기준연료에 대해서 가장 높고 순수메탄의 경우에 가장 낮은 결과를 보인다. 토크를 기준으로 가장 낮은 값을 보이는 순수메탄의 경우 기준 조건인 BTDC 22 CAD에서 약 2 CAD 정도 점화시기를 진각하면 기준연료(100%NG) 수준의 토크값에 해당하는 1,130 Nm의 토크를 얻을 수 있다. 이때 지각된 점화시기 조건에서 진각에 의한 NO_x 배출 증가폭이 MBT 점화시기 조건에 비해 크지 않기 때문에 NO_x 배출이 기준연료(100%NG)에 대한 배출값인 176ppm 에 가까운 200 ppm 수준을 유지할 수 확인 할 수 있다.

3.2. 부분부하 운전조건에서의 토크 보상

상기 절에서 대상 엔진에 대해서 최대토크 성능을 보이는 1,400 rpm 전부하 조건에서의 토크 보상은 NO_x 배출이 규제치 이하로 유지되는 조건에서 가능함을 확인하였다. 연료의 연소속도에 영향을 많이 받는 2,100 rpm 부분부하 조건인 450 Nm 부하에서 점화시기에 따른 영향을 살펴보기 위해 Fig. 5와 같이 각각의 연료에 대한 토크 결과를 얻었다. Fig. 2에서와 같이 MBT 점화시기에 비해 기준 점화시기 (BTDC 30 CAD)가 지각된 조건이지만 지각된 정도(9 CAD)가 전부하 조건(15 CAD)에 비해 작음을 알 수 있다. 질소의 비율이 증가할수록 토크가 감소하고 순수메탄의

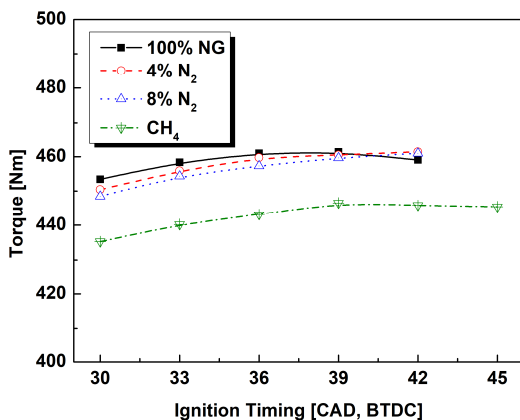


Fig. 5. Torque variations for each gas composition with ignition timing under 2,100 rpm part load operating conditions.

경우 가장 낮은 토크의 경향은 동일하지만, 순수메탄을 사용한 경우 토크 감소폭(18 Nm@ 기준 점화시기)이 크게 나타났다.

이런 경향의 원인은 Fig. 6에 나타난 열효율 결과에서 찾을 수 있다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이 1,400 rpm 전부하 조건에서는 가스 연료의 종류에 따른 효율의 차이가 크지 않았으나, 상대적으로 고속 회전수 조건인 2,100 rpm 조건에서의 열효율은 동일한 경향이 있지만 차이의 폭이 크게 나타났다. 이전 연구결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 성분 변화에 따른 연소속도 감소가 효율에 영향을 미쳤으며[7-11], 결과적으로

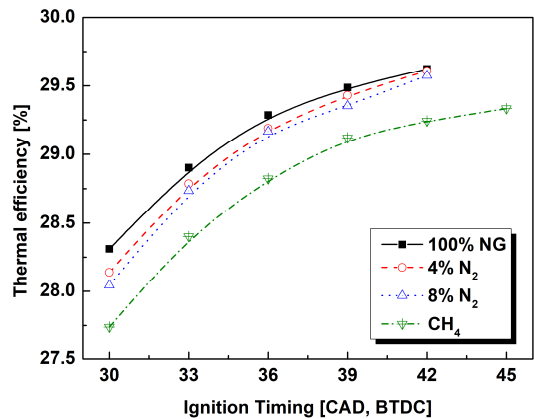


Fig. 6. Thermal efficiency variations for each gas composition with ignition timing under 2,100 rpm part load operating conditions.

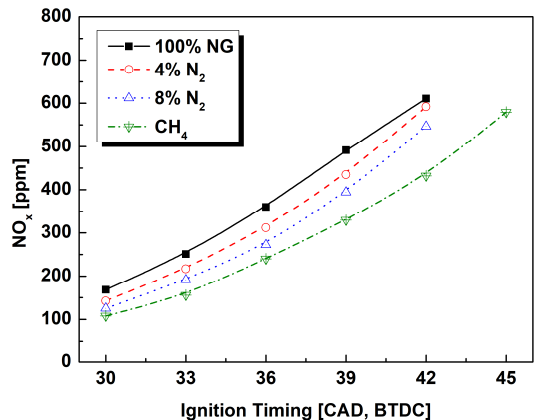


Fig. 7. NO_x variations for each gas composition with ignition timing under 2,100 rpm part load operating conditions.

앞서 논의되었던 총발열량의 감소에 효과가 더해져 큰 차이의 토크 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 7의 고속 부분부하 운전조건에서 NO_x 배출 결과를 살펴보면, 기준조건(BTDC 30 CAD)이 1,400 rpm 전부하 조건(BTDC 21 CAD)에 비해서 점화시기가 진각되었지만 낮은 수준의 배출을 확인할 수 있다. 부분부하조건이기 때문에 연소실로 유입되는 가스연료의 발열량이 낮고 결과적으로 연소온도가 상대적으로 낮기 때문에 나타나는 결과이다. 점화시기 진각에 따른 NO_x 배출 증가폭이 크지 않은 것도 동일한 원인에 의한 결과로 볼 수 있다.

기준 점화시기 조건에서 얻을 수 있는 토크(450 Nm)를 얻기 위한 토크 보상 측면에서 고려하면 질소가 4%, 8% 혼합된 경우 각각에 대해서 약 1.5 CAD, 3 CAD 정도 점화시기의 진각을 통해 기준연료(100% NG) 수준의 토크값을 얻을 수 있고, 이때 NO_x의 배출은 동등수준이거나 약간 증가함을 알 수 있다. 그러나 순수메탄의 경우 급격한 효율감소로 인해 점화시기 진각만을 통해 토크값을 보상할 수 없기 때문에, 혼합기 양 및 가스연료 총발열량 증가를 위한 스로틀 개도의 증가를 통해서만 토크의 보상이 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 희박연소 방식을 적용하고 EURO-6 배출가스 규제 대응이 가능한 시내버스용 천연가스 엔진에서 천연가스 연료의 발열량 감소 및 조성의 변화가 엔진의 성능과 배출가스에 미치는 영향을 분석하였다. 각 가스연료에 대해서 점화시기 변화에 의한 영향을 살펴보고, 저열량 가스의 적용으로 인한 엔진 출력성능 저하에 대응할 수 있는 제어전략을 배출가스를 고려하여 제시하였다.

1) 엔진의 회전수 및 부하에 관계없이 정상상태 운전 조건에서 천연가스 연료에 질소 혼합비율이 8%까지 증가할수록 토크는 감소하고, 순수메탄에 대해서 가장 낮은 토크값을 보였다.

2) 1,400rpm/전부하조건에서 점화시기가 MBT 점화시기에 가까워질수록 최대 열효율은 가스의 종류에 관계없이 비슷한 수준을 보였으나, 2,100 rpm/부분부하 조건에서는 토크와 비슷한 경향을 보였다.

3) 1,400rpm/전부하조건에서 동일한 효율을 나타내는 MBT 점화시기로 운전하더라도 가스연료의 밀도 감소 및 혼합기의 총발열량 감소로 인해 최대 토크는 기준연료인 천연가스에 비해 낮게 나타났다.

4) 1,400rpm/전부하조건에서 토크를 기준으로 가

장 낮은 값을 보이는 순수메탄의 경우 기준 조건에서 약 2 CAD 정도 점화시기를 진각하면 NO_x 배출의 큰 증가 없이 토크를 보상할 수 있다.

5) 2,100 rpm/부분부하 조건에서 질소가 혼합된 경우 점화시기 진각을 통해 토크를 보상할 수 있으나, 순수메탄의 경우 스로틀 개도의 증가를 통해서만 가능하다.

그리스 문자

λ : air excess ratio

REFERENCES

- [1] Ha, Y. C., Lee, S. M., Kim, B. G., Lee, C. J., "Performance and Emissions Characteristics of a CNG Engine Under Different Natural Gas Composition", *Tras. KSME*, 35(7), 749-755, (2011)
- [2] Min, B. H., Chung, J. T., Kim H. Y., Park S. S., "Effects of Gas composition on the Performance and Emissions of Compressed Natural Gas Engines", *KSME Int. J.* 16(2), 219-226, (2002)
- [3] Mueller, G., "Landfill gas application developmet of the caterpillar G3600 spark ignited gas engine", *J. Eng. Gas. Turb. Power*, 117(4), 820-825, (1995)
- [4] Park, C. W., Kim, C. G., Lee, S. W., Lim, G. H., Lee, S. Y., Choi, Y., "Effect of control strategy on performance and emissions of natural gas engine for cogeneration system", *Energy*, 82, 353-360, (2015)
- [5] Lee, S. W., Lim, G. H., Park, C. W., Choi, Y., Kim, C. G., "Effect of Low Calorific Naural Gas on Performance and Emission Characteristics of Engine", *Tras. KSME*, 37(12), 1129-1135, (2013)
- [6] Lee, S. W., Lim, G. H., Park, C. W., Choi, Y., Kim, C. G., "Performance and Emission Characteristics of Bio-Gas Fuedl with Compressed Natural Gas Engine", *KSME conference proceedings*, 1316-1317, (2013)
- [7] Park, C. W., Oh, S. C., Kim, C. G., Choi, Y., Ha, Y. C., "Effect fo natural gas composition and gas interchangeability on performance and emission characteristics in air-fuel controlled natural gas engine", *Fuel*, 287, 119501, (2021)
- [8] Park, C. W., Oh, S. C., Kim, C. G., Choi, Y., "Control mehods for variations in natural gas composition in air-fuel controlled natural gas engines",

저열량 가스 적용에 따른 천연가스엔진의 대응 방안 연구

- Energy Reports, 7, 942-950, (2021)
- [9] Park, C. W., Lee, S. Y., Kim, C. G., Won, S. Y., Lee, J. H., “A Study on Applicability to Dual-Fuel Engine of Low Caloric Gas”, KIGAS, 14(1), 15-20, (2010)
- [10] Lee, S. Y., “Effects of Spark Plug Chaner on Performance of an SI Engine Fueled by Gaseous Fuel”, KIGAS, 17(6), 27-32, (2013)
- [11] Lee, S. Y., Park, S. H., Park, C. W., Kim, C. G., Lee, J. H., Woo, S. J., “Effects of Inert Gas Composition Variations in Biogas on the Performance of a SI Engine”, KIGAS, 16(5), 14-20, (2012)