



# 인증시험 조건에서 가스조성 변화에 따른 대형 천연가스 엔진 배기가스 및 입자상 물질 배출 특성에 관한 연구

최지선 · †박철웅 · 장형준 · 김창기

한국기계연구원 그린동력연구실

(2021년 9월 7일 접수, 2021년 10월 15일 수정, 2021년 11월 30일 채택)

## A Study on the Emission and Particulate Matter of a Heavy Duty Natural Gas Engine According to Gas Composition under certification tests

Ji-Seon Choi · †Cheol-Woong Park · Hyoung-Jun Jang · Chang-Gi Kim

Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103,  
Republic of Korea

(Received September 7, 2021; Revised October 15, 2021; Accepted November 30, 2021)

### 요약

본 연구에서 인증을 위한 표준가스 종류의 변화가 대형 천연가스 엔진에 미치는 영향을 살펴보기 위해 전부하 시험과 WHTC 모드 시험 조건에서 엔진 성능 및 배기 특성을 비교하고 그 결과를 분석하였다. 실험에 사용된 연료는 표준 가스 두 종류( $G_r$ ,  $G_{23}$ )와 시중에 유통되고 있는 천연가스, 총 3종류를 적용하였다.

연료 조성이 다른 3가지 천연가스의 실험결과 엔진 성능 특성은 질소 함유율이 높은  $G_{23}$  연료에 대해서 토크, 연료소모율, 열효율 결과가 모두 다른 연료에 비해 악화되는 결과를 보였다. 또한 인증시험모드인 WHTC 모드에서 평가하였을 때,  $G_{23}$  연료를 적용한 경우 다른 두 연료에 비해 이산화탄소 및 일산화탄소 배출량은 감소하고 메탄, 질소산화물 및 입자상물질의 개수 배출량은 증가하여 질소산화물의 경우 EURO VI 규제치를 만족할 수 없었다.

**Abstract** - In this study, The full load test and WHTC mode test were performed to examine the effect on a heavy duty natural gas engine according to the type of standard gas for certification to check engine performance and exhaust characteristics. Two types of standard gas ( $G_r$ ,  $G_{23}$ ) and commercially available natural gas were applied as the fuel used.

As a result of the test results of three natural gases with different fuel compositions,  $G_{23}$  with a high nitrogen content was inferior in torque, fuel consumption, and thermal efficiency conditions. In addition, when evaluated in the WHTC mode it was possible to obtain a result that satisfies the EURO VI regulation. However, compared to the other two fuels, the emission characteristics of  $G_{23}$  decreased CO<sub>2</sub> and CO, but increased CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> and PN emissions.

**Key words** : CNG(Compressed Natural Gas), reference fuel, emission, full-load performance, WHTC(World Harmonized Transient Cycle), PN(Particle Number)

†Corresponding author:cwpark@kimm.re.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

세계 1차 에너지 수요는 2040년까지 연평균 0.8%씩 증가할 것으로 예상되고, 그 중 천연가스 수요는 화석연료 가운데 가장 빠르게 연평균 1.2%씩 증가하여 총 1차 에너지 수요에서 25%를 차지할 것으로 보인다. 이처럼 천연가스 수요가 점점 늘어날 전망이다. 이와 더불어 저탄소, 고효율 에너지시스템을 촉진할 수 있는 신기후 정책 또한 향후 천연가스 수요 전망에 결정적인 역할을 할 것으로 보인다[1]. 또한 천연가스는 기존의 디젤 엔진보다 입자상물질(PM), 질소 산화물(NOx)과 같은 배출물을 더 적게 생성하기 때문에 기존 석유 연료(특히 대형 차량 부분)에 대하여 가장 구체적인 대안 중 하나이다[2]. 그러나 차량의 연료로서 천연가스의 경우 수입원의 다변화 및 PNG 도입 등에 따른 가스 조성의 변화가 예상되고, 국내 및 해외에서 운행되는 CNG(Compressed Natural Gas) 차량의 경우 이러한 연료 조성의 변화가 엔진 성능 및 배기 특성에 미치는 영향을 무시할 수 없다[3-4]. 따라서 연료 조성이 변화하여 천연가스 차량에 적용되었을 때, 연료 성분 변화에 따른 연료공급시스템 핵심부품을 포함한 엔진의 성능이 검증되어야 하고, 기존의 제작사의 배출가스를 기준으로 하는 배출가스 규제에 미치는 영향에 대해 검토되어야 한다.

제작된 차량은 배출가스 인증 시험을 실시하여 배출가스 기준의 초과여부를 확인하는 과정을 거친다. 자동차 표준연료는 자동차의 연비, 배출가스 등 인증 시험에 사용되는 연료로서 미국, 유럽, 일본, 중국 등 자동차 선진국에서는 자동차 표준연료의 품질 기준을 법으로 정하고 있으며 자국의 유통 품질 기준보다 강화된 형태로 운영하고 있다. 국내의 경우 인증시험에 사용되는 천연가스연료에 대한 기준을 따로 마련해 놓고 있지 않지만, 천연가스를 공급하는 한국가스공사에서 사용자 측에서 불편함이 없도록 발열량을 관리하여 공급하고 있다. 발열량을 유지하기 위해 필요한 최소한의 메탄, 에탄 등의 조성을 지속적으로 검사 및 범위 내에서 유지하고 있다. 석유 및 석유대체 연료사업법과 대기 환경보전법에서는 메탄과 에탄의 부피 비율을 각각 88%, 7% 이상으로 기준을 충족하는 유통 연료를 사용하도록 규정하고 있다. 그러나 실제 현장에서 사용되는 유통연료의 품질은 연료 제조사별 원유, 생산 공정, 배합기제 수급 등의 차이에 따라 연료의 품질 차이가 발생한다. 이러한 유통연료를 사용하여 인증시험을 진행할 경우, 자동차의 연비와 배출가스 시험 결과 등의 편차가 발생할 가능성이 상존한다[5].

이에 본 연구에서는 천연가스 연료 종류가 전부가

성능 시험 및 배출가스 인증 시험 조건에서 엔진에 미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 엔진 성능 및 배기 특성을 분석하였다.

## II. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 연료 조성

본 연구는 대형 천연가스 엔진의 유럽 인증조건 하에서 시험을 수행한 결과를 분석한 것으로서 유럽시장에서 사용되는 연료의 두 가지 범위(range) 중 H 범위에 해당하는 G<sub>r</sub>, G<sub>23</sub> 연료를 적용하여 실험을 수행하였다. H 범위(G<sub>r</sub> - CH<sub>4</sub> : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 87% : 13%, G<sub>23</sub> - CH<sub>4</sub> : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 92.5% : 7.5%)와 L 범위(G<sub>r</sub>, G<sub>25</sub> - CH<sub>4</sub> : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 86% : 14%)에 해당하는 연료는 각각 유럽시장에서 사용되는 표준연료에 가까운 조성으로 2가지를 선택하도록 하고 있다[6]. G<sub>r</sub> 연료 조성은 현재 유럽시장에서 사용되는 천연가스 연료의 평균 조성과의 유사하다. H 범위에 해당하는 G<sub>23</sub> 연료의 경우 L 범위에 해당하는 G<sub>25</sub> 연료에 비해 천연가스연료의 주성분인 메탄의 비율이 높고, 향후 LNG 수입국 다변화 및 PNG 도입 가능성에 따른 높은 메탄 비율이 예상되는 천연가스의 성분에 부합하는 대표연료로 간주할 수 있다. 이에 두가지 연료 범위 중 H 범위에 해당하는 G<sub>r</sub>, G<sub>23</sub> 연료를 선정하여 실험을 수행하였다. Table 1에 본 연

Table 1. Properties of fuel

Component	G <sub>market</sub>	G <sub>r</sub>	G <sub>23</sub>
CH <sub>4</sub>	93.07%	86.99%	92.42%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.36%	13.01%	-
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.92%	-	-
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.19%	-	-
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.24%	-	-
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.01%	-	-
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.00%	-	-
N <sub>2</sub>	0.20%	-	7.58%
Lower heating value [MJ/kg]	49.76	49.72	46.25
H/C ratio [-]	3.84	3.77	4.00
MN	88.56	81.08	108.42
Stoichiometric ratio of AF [wt%]	16.939	16.916	15.012

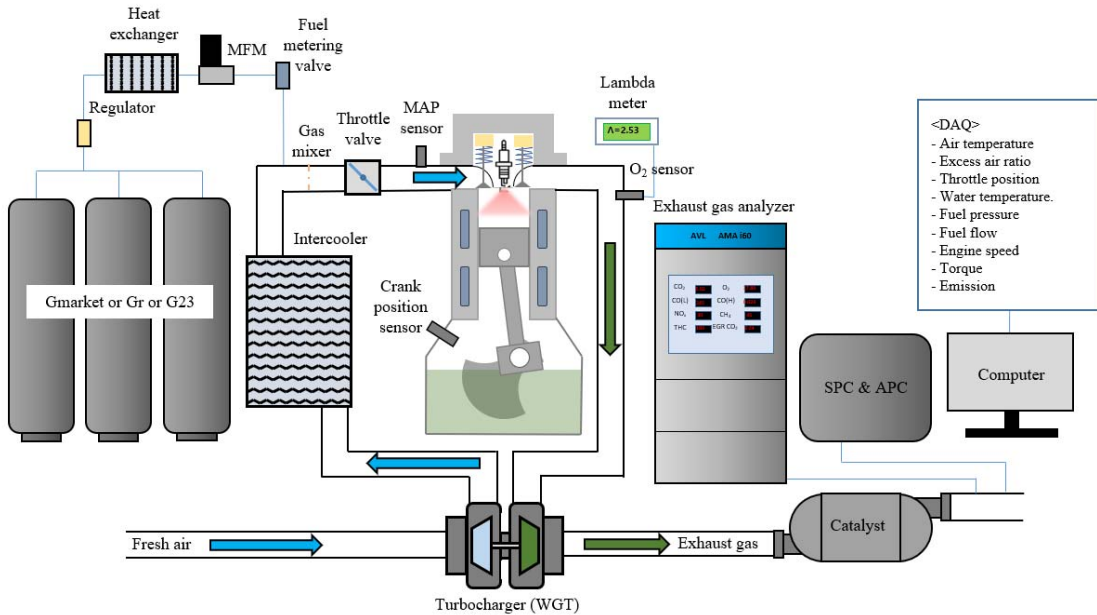


Fig. 1. Schematic diagram of engine experimental setup.

구에서 사용한 천연가스 연료의 조성 및 물성치를 나타내었다.

## 2.2. 실험 장치

Euro VI 규제를 대응하는 시내버스용 대형 천연가스 엔진을 이용하여 천연가스 성분 변화에 대한 실험을 진행하였으며 엔진의 제원은 Table 2에 나타내었다. 엔진 부하 및 속도를 제어하기 위하여 AC 동력계 (Horiba, HD460)를 이용하였으며 Fig. 1에 실험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 시험에 사용되는 표준 연료는 규정된 표준 연료 조건에 부합하도록 KOLAS 성적서를 발행하여 확인하였다. Fig. 1과 같이 여러 개의 가스 용기를 연결하였으며 가스 종류에 따라 용기를 변경하였다. 각 용기의 연료를 균일하게 공급하기 위해 매니폴드를 구성하였다. 또한 천연가스의 안정적인 연료공급을 위하여 12 MPa 정도 충전된 고압용기에 연결하여 실험을 수행하였다. 공급된 연료는 레귤레이터에서 0.8 MPa로 감압되며 Fuel Metering valve(연료분사기모듈)로 공급되도록 하였다. 이때 레귤레이터에서 감압된 연료의 팽창에 의한 연료라인의 과도한 냉각을 막기 위해 열교환기와 40 °C 수준의 온수를 지속적으로 공급하여 온도를 유지하는 closed recirculating heater를 통해 엔진에 공급되는 연료의 온도를 일정하게 제어하였다. 연료 유량의 측정에는 Co-

Table 2. Engine specification

Number of cylinders	6 ea
Displaced volume	11.67 L
Bore	133 mm
Stroke	140 mm
Max. power	250 kW at 2000rpm
Max. torque	1373 N.m at 1200rpm
Aftertreatment	TWC

riolis 방식의 Mass flowmeter (Micromotion, CMF025m)를 이용하여 측정하였다.

배기관으로부터 샘플된 배출가스를 배기가스 측정 장비(AVL, AMA i60R1)를 통해 분석하여 주요 배출 가스인 이산화탄소, 일산화탄소, 탄화수소 및 질소산화물을 측정하였다. 또한 입자상 물질의 중량(PM)과 개수(PN) 측정을 위해 SPC와 APC 장비(AVL)를 배기가스 라인 후단에 장착하여 사용하였다.

## 2.3. 실험 방법 및 조건

천연가스 연료 조성의 변화에 따른 성능 변화의 경

인증시험 조건에서 가스조성 변화에 따른 대형 천연가스 엔진 배기가스 및 입자상 물질 배출 특성에 관한 연구

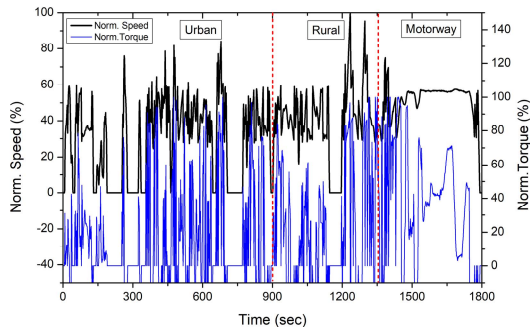


Fig. 2. Engine speed and torque of the WHTC.

향은 전부하 실험을 통해 확인하고, 배출가스 변화 경향은 인증시험 모드인 WHTC 모드 시험을 통해 확인하였다.

전부하 실험은 700 rpm ~ 2100 rpm 범위에서 100 rpm 간격으로 스톱들이 모두 개방된 전부하 실험을 수행하였다.

본 연구에서 차량동력계가 아닌 엔진동력계에서 수행되는 모드 테스트로 EURO VI에 적용되는 시험 모드인 WHTC 테스트를 진행하였다. 대형승용, 화물 및 초대형 승용, 화물 휘발유 자동차가 WHTC 모드를 적용한다. WHTC 모드는 실제 대형 상용차 사용의 세계적인 패턴을 기반으로 생성되었으며 유럽, 미국, 일본, 호주의 일반적인 운전 조건을 포함하였다. 총 1800 초로 이루어져 있고 여러 모터링 구간을 포함하고 있으며 Fig. 2와 같이 도시, 시골, 고속도로 세 파트로 나뉘어져 구성되어 있다. WHTC 모드는 Cold 및 Hot 테스트로 구성되어 있으며 실시간으로 엔진을 운전하며 배출가스를 측정한다. 이는 냉간 시 배출 가스를 측정하기 위해 냉간 및 Hot soaking 구간을 포함하여 실차 조건에 가깝게 배출가스를 측정할 수 있는 모드이다. Cold WHTC 테스트는 엔진 냉각수 및 오일 온도가 20 ~ 30 °C 내에 있을 때 실험을 시작하며 엔진시동과 동시에 테스트가 진행된다. Cold WHTC 테스트가 종료된 후 10±1분간 엔진을 정지하여 소킹 후 Hot WHTC 테스트를 수행하였다. 모드 시험 시 셀 내부는 항온 항습 시스템을 이용하여 25 °C, 50%로 일정하게 유지하였다. 또한 기존에 측정하였던 배출 가스(HC, NOx, CO) 및 입자상물질에 입자상물질 개수를 추가하여 측정한다.

### III. 실험 결과

#### 3.1. 전부하 성능 특성

Fig. 3 ~ 6는 연료 종류에 따른 토크, 연료소모율, 열

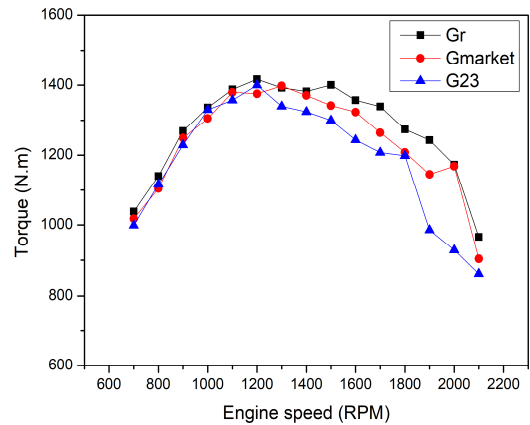


Fig. 3. Variations in torque with engine speed for each natural gas composition.

효율, 배기가스 온도를 엔진 속도에 따라 보여주고 있다. 연료소모율은 제동 출력(kW) 당 연료의 질량대비 소모율(g/h)로 계산하였으며, 제동 열효율은 공급된 연료의 발열량 당 제동 출력으로 계산되었다. 600 ~ 1,200 RPM 까지 각 연료별 토크는 비슷하게 나타나고 있다. 하지만 동일한 속도 범위에서 연료소모율은 G<sub>23</sub> 이 가장 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. 연료소모율이 높은 것은 연료 공급 유량이 많음을 의미하며 공연비 설정치를 만족하기 위하여 연료유량이 많아진 것으로 확인된다. 일반적으로 천연가스 엔진에서의 출력 성능은 연료의 연소속도에 영향을 많이 받는데[7], 1,200 rpm 미만의 낮은 회전수 조건에서는 연소속도에 의한 영향이 크게 나타나지 않았다. 그러나 보다 높은 회전수 조건인 1,200 RPM 이상에서는 연소실내에서 피스톤의 움직임에 비해 느린 연소속도의 영향이 크게 나타나기 때문에 토크의 변화 폭이 크게 나타난 것으로 판단되고 결과적으로 G<sub>23</sub>를 사용한 조건의 토크가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 G<sub>23</sub>의 경우 다른 연료 조성에 비해 연료가스 내에 질소 비율이 높기 때문에 연소시간이 증가하여 이에 의한 영향이 크게 나타났음을 짐작할 수 있다. 연소속도의 감소에 의한 영향이 지배적이기 때문에 연료량을 증가하여 공연비를 맞추더라도 토크가 감소됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 전부하 운전조건에서 천연가스 조성변화에 따른 열효율의 변화를 나타낸 것으로 G<sub>23</sub> 연료의 경우 연료량을 증가하여 공연비를 제어하더라도, 다른 연료에 비해 상대적으로 많은 양의 연료가 공급되어야 하기 때문에 엔진의 회전수에 관계없이 효율이 낮은 결과를 보이고 있다.

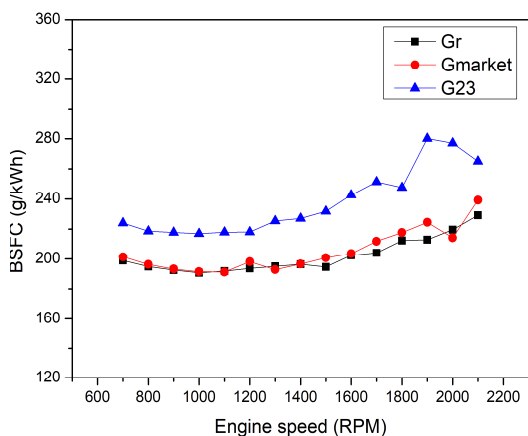


Fig. 4. Variations in brake specific fuel consumption with engine speed for each natural gas composition.

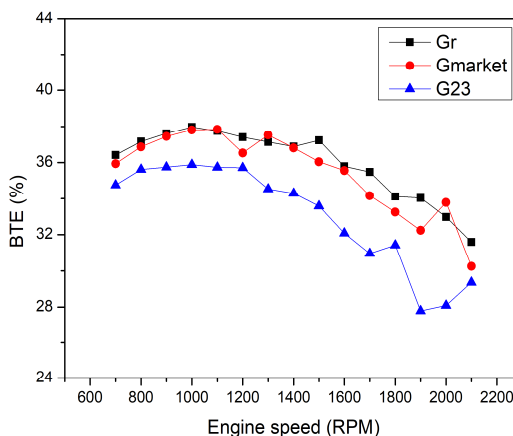


Fig. 5. Variations in brake thermal efficiency with engine speed for each natural gas composition.

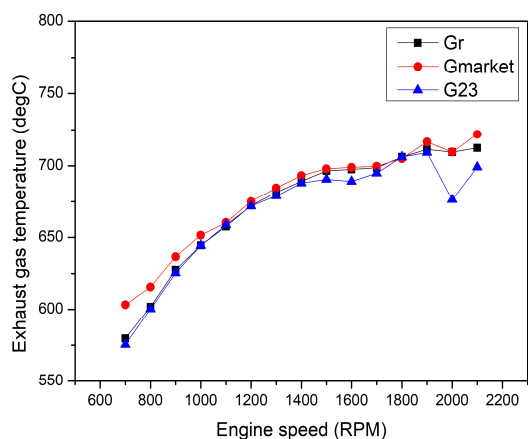


Fig. 6. Variations in exhaust gas temperature with engine speed for each natural gas composition.

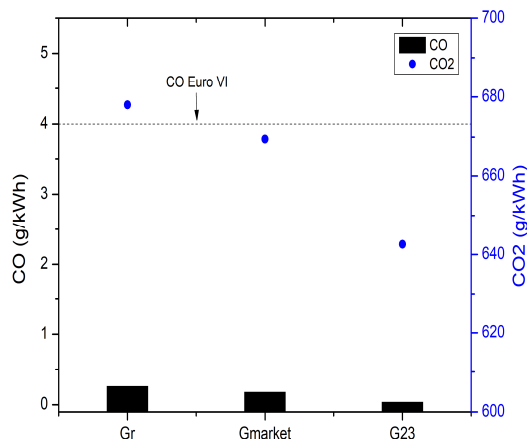


Fig. 7. Variations in BSCO2 and BSCO with engine speed for each natural gas composition.

Fig. 6은 효율과 연계하여 연소속도가 가장 느린 G<sub>23</sub>의 배기가스 온도가 높게 나타나야 하지만, 동일한 공연비 및 공급열량 조건에서 배기가스의 온도변화는 가스의 종류에 크게 영향이 없는 것으로 보아 연소속도의 차이에 따른 냉각손실의 차이가 크거나, 연료의 일부가 연소되지 않고 배출된 것으로 예상된다[8].

### 3.2. WHTC 모드 배출가스 특성

각 연료에 따른 배출가스 특성을 WHTC 시험 모드 결과를 통하여 비교하였다. 배출가스 비교 인자는 이

산화탄소, 일산화탄소, 비 메탄 탄화수소, 메탄, 질소 산화물, 입자상물질, 입자상물질 개수를 제동 출력의 비로 나타내어 연료 특성에 따라 비교하였다.

Fig. 7는 이산화탄소 배출량과 일산화탄소 배출량을 연료 종류에 따라 보여주고 있다. 동일한 효율이라고 가정할 때 이산화탄소의 배출은 연료소비량 및 연료 내에 포함되어 있는 탄소원자 수에 비례하여 나타나는데, 본 연구에서는 상대적으로 열효율이 낮은 G<sub>23</sub> 연료의 이산화탄소 배출이 높을 것으로 예상했다. 그러나 G<sub>23</sub> 연료 조성에서 가장 낮은 수준의 이산화탄소

인증시험 조건에서 가스조성 변화에 따른 대형 천연가스 엔진 배기가스 및 입자상 물질 배출 특성에 관한 연구

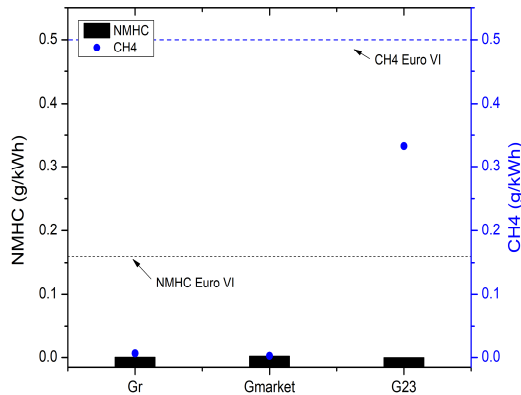


Fig. 8. Variations in BSCH4 and BSNMHC with engine speed for each natural gas composition.

배출을 확인할 수 있으며 이는 열효율 보다는 메탄의 비율이 높은 연료의 특성상 연료 내 탄소원자수가 작은 것이 지배적으로 작용하였음을 보여주는 결과이다. 일산화탄소 배출량 또한 이산화탄소 배출량과 유사한 경향을 보였다. 일산화탄소의 경우 상대적으로 농후한 공연비 조건에서 연료의 불완전연소에 의해 배출되는 것이 일반적이데, 동일한 공연비 조건에서 탄소원자수가 많은 성분이 포함된 다른 연료에 비해 연료의 대부분이 메탄으로 구성되어 있는 G<sub>23</sub> 연료의 경우 불완전연소에 의한 일산화탄소의 배출이 낮은 것으로 볼 수 있다[9].

Fig. 8은 비 메탄 탄화수소와 메탄 배출량을 연료 종류에 따라 나타내고 있다. 메탄 배출 원인은 연소되지 않은 메탄이 가스 교환 과정에서 배출되는 것과 오일링에 흡수된 미연 가스가 다음 연소에 영향을 미쳐 배출의 원인이 될 수 있다. G<sub>23</sub>연료의 경우 불활성가스인 질소를 제외한 연료성분은 메탄이 전부 차지하고 있으며, 연소특성에 의해 메탄 배출이 증가할 수 있는 가능성이 다른 연료에 비해 높다. 탄소원자수가 높은 다른 성분의 연료는 가스교환 또는 오일링에 흡수된 미연가스로 인해 배출되더라도 촉매에서의 전환특성이 좋기 때문에 비메탄 탄화수소 배출 증가에 영향을 미치지 않는 반면, 메탄의 경우 촉매에서의 전환반응율이 낮기 때문에 연소특성에 의해 배출된 미연 메탄 성분이 그대로 반영되어 G<sub>23</sub> 연료의 메탄 배출이 높게 나타난 것으로 판단된다. 비 메탄 탄화수소는 삼원 촉매에 의해 높은 효율로 분해되어 세 종류의 연료 모두 거의 나타나지 않는다[10].

Fig. 9은 질소 산화물 배출량을 보여주고 있다. 질소 산화물 배출량은 G<sub>23</sub>에서 가장 높게 나타나는 것을

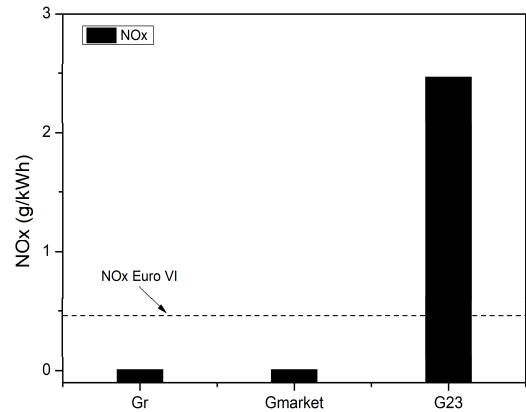


Fig. 9. Variations in BSNOx with engine speed for each natural gas composition as various gas.

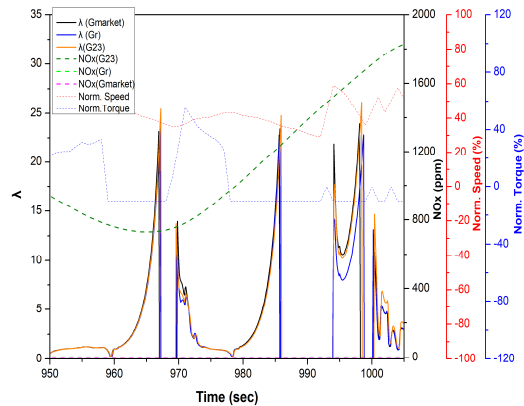
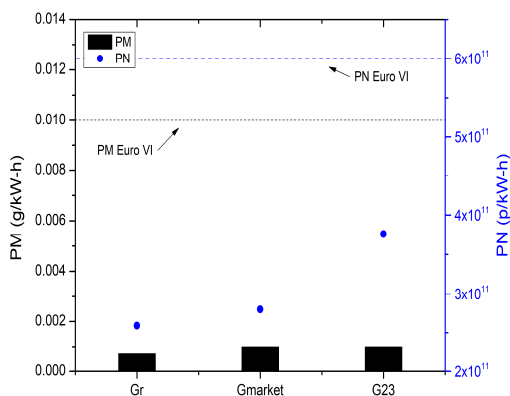


Fig. 10. Excess air ratio changes according to time during WHTC mode test with various gas compositions.

확인할 수 있다. G<sub>23</sub>은 다른 연료에 비해 질소의 함유량이 크며 이는 효율 저하로 이어진다. 따라서 시간에 따른 가속, 감속이 큰 과도운전 조건에서 G<sub>23</sub>이 상대적으로 요구되는 연료공급유량이 많다. 시간에 따라 요구되는 공급 유량의 변화가 크기 때문에 엔진의 ECU(Engine control unit)에서 이에 따른 보상이 없는 경우 희박한 조건이 자주 발생하고 삼원촉매에서의 정화율 감소로 질소 산화물이 증가된 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위해 각 연료에 따라 모드시험에서 급 감속 또는 가속 되는 구간에서의 공기과잉율을 Fig. 10에 나타내었다. 다른 두 연료에 비해 G<sub>23</sub>의 공기과잉율이 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 급격한



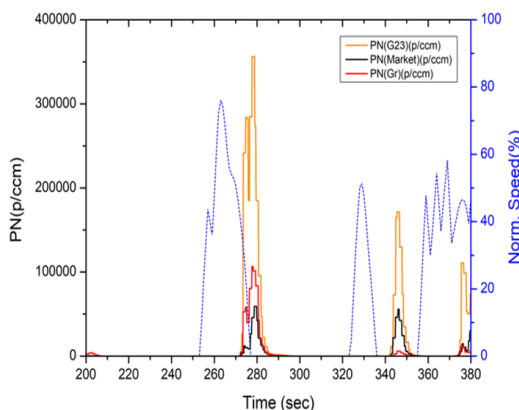
**Fig. 11.** Variations in PM and PN with engine speed for each natural gas composition as various gas. PM and PN as various gas.

조건에서 연료 유량 변화에 따른 희박 조건의 연소가 질소 산화물 배출량 증가의 원인을 확인하였다.

Fig. 11은 입자상물질과 입자상물질 개수를 나타낸 그래프이다. 모든 연료에 대한 입자상 물질의 값은 비슷한 수준인 것을 확인할 수 있다. 가솔린, 디젤과는 달리 천연가스는 주로 메탄으로 구성되어 있다. 낮은 분자 질량과 간단한 분자 구조를 가진 메탄은 연소 시 낮은 입자상물질의 원인이 된다. 따라서 연료의 특성과 관계없이 동일하게 낮은 수준의 입자상 물질의 경향이 나타남을 확인할 수 있다[11].

입자상물질 개수는 G<sub>23</sub>에서 다른 연료에 비해 높게 나타났다. G<sub>23</sub>연료의 경우 불활성가스인 질소를 제외한 연료성분은 메탄이 전부 차지하고 있으며, 연소특성에 의해 메탄 배출이 증가할 수 있는 가능성이 다른 연료에 비해 높다. 메탄의 간단한 분자구조 및 낮은 탄소원자수로 인해 PN의 배출이 낮게 나타나는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 상대적으로 연료 내에 메탄의 비율이 높은 표준연료와 G<sub>23</sub>연료 조건에서 PN의 배출이 높게 나타났다.

수트(soot)의 발생이 입자상 개수의 증가 요인이 되는데, 수트는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>와 같은 인자들이 생성되며 이는 무거운 탄화수소를 가지고 있는 연료에서 잘 생성된다. [11, 12]. 표준연료의 경우 이와 같은 원인에 의해 탄소원자수가 높은 조성의 성분이 다른 연료에 비해 많이 포함되어 있기 때문에 입자상물질의 생성이 촉진되었기 때문으로 보인다. G<sub>23</sub> 연료의 경우 연료의 조성이 PN의 배출에 직접적으로 영향을 미쳤다고 보다는, 상대적으로 발열량이 낮은 연료를 사용할 경우 과도응답 운전조건에서 급가속 또는 감속시 형성되는 연소실 내 부압으로 인해 배기관으로 배출되



**Fig. 12.** PN changes according to time during WHTC mode test with various gas compositions.

는 오일의 증가가 PN 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. Fig.12를 살펴보면 앞서 설명한 것과 같이 긴 이들 기간 후 급격한 조건 변화되는 구간에서 입자상물질 개수가 증가하는 것을 확인할 수 있다[13].

#### IV. 결론

본 연구에서 천연가스 연료 조성에 따라 대형 CNG 엔진에 미치는 영향을 목적으로 전부하 성능, WHTC 모드 실험을 수행하였으며 이를 통해 엔진 성능 및 배기 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 엔진 성능 특성은 토크, 연료소모율, 열효율 모두 G<sub>23</sub>의 결과가 열등한 것을 볼 수 있다. 이는 다른 연료에 비해 질소 함유율이 높은 G<sub>23</sub>의 연료 특성으로 연소속도가 저하되어 엔진 성능에 악조건으로 영향을 미친 것을 알 수 있다.

(2) G<sub>23</sub>의 경우 이산화탄소, 일산화탄소 배출량은 H/C 값 증가의 영향으로 감소하였다. 또한 질소 함유율이 높은 G<sub>23</sub>이 연소 효율 감소 및 연소 온도 저하에 의하여 메탄 발생량이 증가하였다. 또한 낮은 효율에 의해 급격하게 변화하는 조건에서 희박 조건이 자주 발생하여 질소 산화물 배출량이 증가하는 것을 확인하였다.

(3) 연료에 따른 입자상물질의 차이는 크지 않았으나 상대적으로 연료 내에 메탄의 비율이 높은 표준연료와 G<sub>23</sub>연료 조건에서 PN의 배출이 높게 나타났다. 표준연료의 경우 연료내에 포함된 탄소원자수가 높은 조성의 성분이, G<sub>23</sub> 연료의 경우 연소실 내 부압으로

로 인해 배기관으로 배출되는 오일의 증가가 PN 배출에 영향을 미친 것으로 보인다.

(4) 연료 조성이 다른 3가지 연료를 WHTC 모드에서 평가하였을 때  $G_{23}$  연료의 경우 다른 두 연료에 비해 엔진 성능이 감소하고  $NO_x$  배출의 증가로 EURO VI 규제를 만족할 수 없었다.

## REFERENCES

- [1] Han, W. H., Ryu, S. H., Lee, S. B., Do, H. W., and Choi, Y. J., “Global LNG Outlook 2021-1H”, KOGAS RIEM, (2021)
- [2] Hallquist, A. M., Jerksjo, M., Fallgren, H., Westerlund, J., and Sjodin, A., “Particle and gaseous emissions from individual diesel and CNG buses”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 5337-5350, (2013)
- [3] Ha, Y., C., Lee, S., M., Kim, B., G., and Lee, C., J., “Performance and emission characteristics of a CNG engine under different natural gas compositions”, *KSME*, 35(7), 749-755, (2011)
- [4] Lee, S., W., Lim, G., H., Park, C., W., Choi, Y., and Kimm, C., K., “Effect of low calorific natural gas on performance and emission characteristics of engine”, *KSME*, 37(12), 1129-1135, (2013)
- [5] Hwang, I. H., Kang, H. K., Seong, S. R., Song, H. Y., Ha, J. H., and Na, B. K., “A feasibility study on Introducing Reference Fuel(Diesel) for Testing Vehicles in South Korea”, *Oil & Applied Science*, 34(4), 974-985, (2017)
- [6] “Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression-ignition engines and positive ignition engines for use in vehicles”, United Nations, 11-12, (2014)
- [7] Park, C., Oh, S., Kim, C., Choi, Y. and Ha, Y., “Effect of natural gas composition and gas interchangeability on performance and emission characteristics in an air-fuel controlled natural gas engine”, *Fuel* 287, 119501, (2021)
- [8] Jang, H., J., Yoon, J., K., Lee, S., Y., Kim, Y., R., Kim, J., H., and Kim, C., K., “Effect of CNG Heating Value Variations on Emissions Characteristics in a Diesel-CNG Dual-Fuel Engine”, *KIGAS*, 20(6), 43-49, (2016)
- [9] Jammalamadaka, S., “Effect of Natural Gas Fuel Composition on Gaseous and Particle Number/Mass Emissions from a Heavy-duty Natural Gas Engine used in Unconventional Well Development Operations”, West Virginia University, Master of Science in Mechanical Engineering, (2018)
- [10] Zhang, Q., Li, M., Li, G., Shao, S., and Li, P., “Transient emission characteristics of a heavy-duty natural gas engine at stoichiometric operation with EGR and TWC”, *Energy*, 132, 225-237, (2017)
- [11] Karavalakis, G., Gysel, N., Hajbabaei, M., Durbin, T., Johnson, K., and Miller, W., “Influence of Different Natural Gas Compositions on the Regulated Emissions, Aldehydes, and Particle Emissions from a Transit Bus”, *SAE Int*, (2013)
- [12] Amirante, R., Distaso, E., Di Iorio, S., Sementa, P., Tamburrano, P., Vaglieco, B. M., and Reitz, R. D., “Effects of natural gas composition on performance and regulated, greenhouse gas and particulate emissions in spark-ignition engines”, *Energy Conversion and Management*, 143, 338-347, (2017)
- [13] Napolitano, P., Alfe, M., Guido, C., Gargiulo, V., Fraioli, V., and Beatrice, C., “Particle emissions from a HD SI gas engine fueled with LPG and CNG”, *Fuel*, 269, (2020)