

# 부분부하에서 연료 조성이 천연가스 엔진의 연소 및 배기에 미치는 영향

김형민† · 이기형\* · 김봉규\*\*

## The Effect of Fuel Composition on Emissions and Combustion of CNG Engine at Partial Load

Hyungmin Kim, Kihyung Lee and Bonggyu Kim

**Key Words :** Combustion(연소), Compressed Natural Gas(압축천연가스), Emissions(배출가스), Fuel Composition(연료조성), Partial load(부분부하)

### Abstract

Compressed natural gas has good potential for alternative vehicle fuel due to its economical and clean characteristics. However, the composition of natural gas based on production location is known to affect performance and emissions of CNG engine. Thus, the objective of this paper is to clarify the effect of fuel composition on combustion and emissions of CNG engine. This paper presents combustion characteristics obtained from running a 2.5L, 4-cylinder CNG engine retrofitted IDI diesel engine with engine dynamometer. BSFC, emissions, fuel consumption and combustion pressure were measured under steady state operating conditions especially at partial load for CNG engine. Based on the experimental results, we found that CNG composition affects engine performance, fuel conversion efficiency and burning rate.

#### 기호설명

WI(Wobbe Index): 웨버 지수 ( $\text{kcal/Nm}^3$ )  
LHV(Low Heating Value): 저위발열량 ( $\text{kcal/Nm}^3$ )  
SG(Specific Gravity): 비중  
k: 산소함유량에 대한 보정계수  
MON(Motor Octane Number): 옥탄가  
MN(Methane Number): 메탄가

### 1. 서론

최근 석유자원의 고갈과 환경 규제의 강화로 인하여 친 환경성이 높은 대체 연료가 각광 받고 있다. 특히, CNG(압축 천연가스) 차량은 대기오염 저감 및 에너지 수급안정이라는 두 가지 문제를 동시에 해결할 수 있는 대체에너지로서 가장 현

실적인 방안으로 제시되고 있다[1]. 이러한 CNG 차량의 엔진은 현재 운행중인 가솔린 및 디젤엔진의 구조를 크게 변경하지 않고도 사용이 가능하며, 옥탄가가 130 정도로 높기 때문에 높은 압축비에서 노킹이 없는 운전이 가능하고[2], 열효율과 출력이 높을 뿐만 아니라 연소 한계범위가 넓어 희박연소의 실현이 용이하므로 저연비화 및 저 NOx 화가 가능하다[3]. 또한 입자상 물질의 배출도 매우 낮은 수준임을 보여준다. 이러한 장점으로 인하여 천연가스 자동차는 지속적인 증가 추세에 있으며, 엔진 개조 사업을 통하여 노후 차량을 천연가스 자동차로 개조하는 사업도 진행 중에 있다[4].

천연가스는 매장량과 산출 지역 분포 및 가격 면에서도 석유보다 유리하여 연료의 안정적 공급이 용이하므로 공급측면에서도 매우 유리한 연료로 평가되고 있다. 그러나 현재는 수요가 그다지 많지 않아서 수입원이 일부 지역으로 제한되어 있지만 용도 및 사용처의 확대에 의하여 수요가 증가 할 경우 수입원의 다변화가 뒤따를 것이다.

---

† 회원, 한양대학교 대학원  
E-mail : hyungmin@hanyang.ac.kr  
TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550  
\* 한양대학교  
\*\* 한국가스공사

이러한 상황에서 연료 충전소가 고정되어 있지 않은 자동차의 경우, 사용되는 가스의 조성에 따라 출력 및 배기 특성이 큰 영향을 받을 것으로 예상된다. 천연가스는 기체 상태로 존재하고, 석유연료와 달리 정제 과정을 거치지 않으므로 그 조성이 가스마다 차이가 나게 된다. 이와 같은 조성은 산지, 계절, 온도 등에 영향을 받아 지구상에 존재하는 대부분의 천연가스가 각각 다른 조성을 나타낸다.

따라서, 본 연구에서는 간접 분사 방식의 디젤 엔진을 천연가스엔진으로 개조하여 각 산지 별 연료의 연소 및 배기 특성을 파악함으로써, 천연가스 도입선의 다변화에 따라 발생하는 문제점에 대응할 수 있도록 연료조성 별 연소 특성을 데이터베이스화 하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 2476cc, 4 기통 IDI 디젤 엔진을 천연가스 엔진으로 개조하여 Fig. 1 과 같이 실험장치를 구성하였고, 주요 제원은 Table 1 과 같다. 디젤 엔진 헤드의 인젝터를 제거하고 스파크 플러그를 장착하였고, 흡기관에 CNG 인젝터(Bosch)를 장착하여 분사하는 방식을 이용하였다. 배기관에는 산소센서를 설치하여 ECU(Electronic Control Unit)에서 이론 공연비로 제어 가능하게 하였다. 질량식 연료유량계(Micro motion CFM010)를 설치하여 연료유량을 측정하였으며, 1 번 연소실에 스파크 플러그 일체형 압력센서(Kistler 6015B)를 설치하여 연소실 압력을 취득하였고, EC 동력계(Meidensha - EC80, 220kW)를 이용하여 토크와 출력을 측정하였으며, 배기분석계(Horiba - Mexa7100D)를 통하여 배기 분석을 실시하였다.

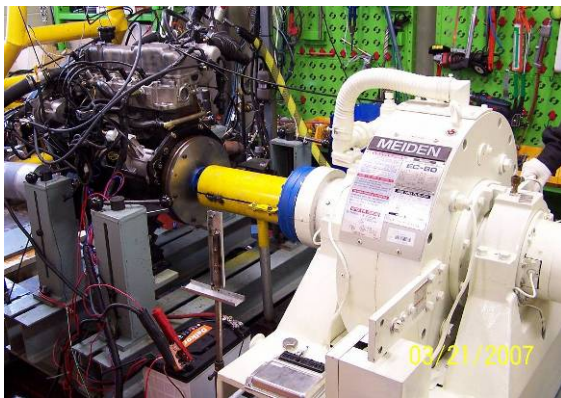


Fig. 1 Photograph of CNG engine and dynamometer system

Table 1 Specification of CNG engine

	IDI diesel		CNG	
Cylinder	4		4	
Displacement volume	2476cc		2476cc	
Bore	91.5mm		91.5mm	
Stroke	95mm		95mm	
Valve timing	IVO	BTDC 20°	EVO	BBDC 20°
	IVC	ABDC 20°	EVC	ATDC 20°
Compression ratio	21.5		12.5	
Injection type	In-direct injection		Port fuel injection	

### 2.2 시험연료

본 연구에서는 연료 조성에 따른 연소특성을 측정하기 위하여 산지 별로 조성이 다른 천연가스 6 종의 연료를 사용하였고, 연료의 구성성분 및 주요물성은 Table 2 와 같다. 실험에 사용된 연료는 국내 도입 천연가스인 Ref. gas 와 세계 여러 산지의 천연가스를 대표하는 4 종의 혼합가스, 그리고 순수메탄 가스로 구분되어 있다. 또한 연료 조성에 따른 물성값은 한국가스공사로부터 제공 받았으며, WI(Wobbe Index)와 CP(Combustion Potential)값은 식(1), (2)에 의해 구해졌다. 여기서, WI 는 가스연료의 저위 발열량과 연관된 지수이며, CP 는 수소의 연소속도를 기준으로 각 가스의 연소속도를 표준화하여 혼합가스의 연소속도를 이론적으로 계산할 수 있도록 정의한 식이다[5].

$$WI = \frac{LHV}{\sqrt{SG}} \quad (1)$$

$$CP = k \frac{H_2 + 0.6(CO + C_m H_n) + 0.3CH_4}{\sqrt{SG}} \quad (2)$$

Table 2 Compositions and properties of test fuels

	Ref. gas	Australia	Tangguh	Yemen	Egypt	Methane
CH <sub>4</sub>	90.09	87.06	91.64	93.49	96.96	100.00
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.04	8.40	1.93	5.08	2.60	0.00
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.54	3.48	5.65	1.16	0.30	0.00
IC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.54	0.42	0.16	0.08	0.07	0.00
NC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.58	0.54	0.10	0.11	0.05	0.00
IC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00
NC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
N <sub>2</sub>	0.19	0.07	0.42	0.06	0.01	0.00
Propylene	--	--	0.10	--	--	--
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
LHV	9532.3	9798.5	9487.3	9109.0	8814.8	8574.1
SG	0.627	0.645	0.626	0.594	0.573	0.555
WI	12040	12201	11991	11814	11650	11510
CP	41.5	42.1	40.7	41.4	40.8	40.3
MON	121.9	118.8	122.1	125.3	134.3	140
MN	72.7	68.3	73.1	77.7	90.7	100
Density	0.810	0.834	0.809	0.769	0.740	0.717

### 2.3 실험조건 및 방법

Table 3 Experimental conditions

	Conditions
Engine speed	1000 ~ 4000 RPM
Fuels	Ref. gas 외 5 종
Load	WOT, Partial load
Spark timing	Fixed (MBT of Ref. gas)
Intake condition	N.A.
Excess air ratio	1
Injection pressure	8 bar

본 연구에서 사용된 엔진은 간접 분사식 디젤 엔진을 개조한 것이므로 기본 성능 실험을 먼저 수행하였다. 기본 성능 시험 시 전부하(WOT) 조건에서 엔진의 최대 토크와 출력을 평가하였고, 연료조성이 달라졌을 때 발생하는 문제점에 대해 연구하기 위하여 점화시기는 기준 가스의 MBT(Maximum Brake Torque)에 맞추어 실험하였다. 또한, 엔진은 거의 부분부하에서 운전되기 때문에 부분부하 영역에 초점을 맞춰 연구를 진행하였으며, 실험조건은 Table 3 과 같다. 부분부하 영역에서 연료조성에 따른 연소 및 배기 특성을 파악하기 위하여 스로틀개도를 1/3 로 하고 모든 조건을 동일하게 유지한 상태에서 연료와 엔진 회전수를 변화시키며 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 동력계와 제어장치를 사용하여 토크와 출력, 각종 엔진 부분의 온도와 압력을 측정하였고, 질량 유량계를 통하여 엔진에서 소비되는 연료 유량을 측정하였다. 엔진의 출력과 유량을 통하여 BSFC( Brake Specific Fuel Consumption)와 Fuel conversion efficiency 등을 계산하였다. 또한, 연소실의 압력센서로 측정된 실린더 압력을 이용하여 IMEP(Indicated Mean Effective Pressure), ROHR(Rate of Heat release) 그리고 MBF(Mass Burn Fraction)를 계산하였다. 배기 분석계를 통해 측정된 NOx, THC, CO 등은 농도 단위로 측정되었기 때문에 출력으로 표준화하여 표시하였다.

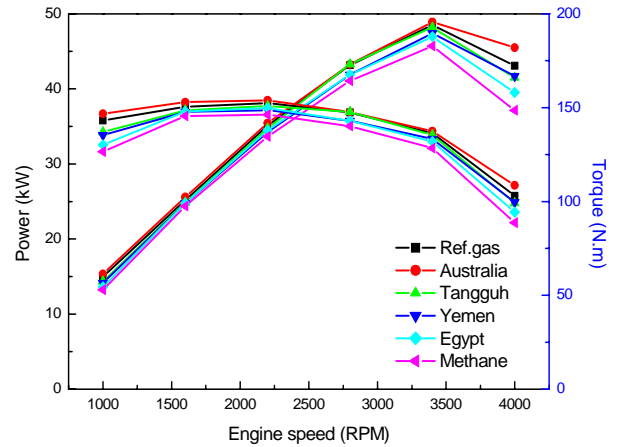
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 CNG 엔진의 기본 성능

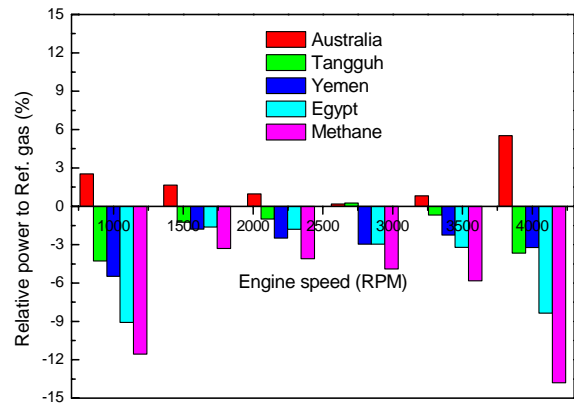
CNG 개조 엔진의 기본 성능을 평가하기 위하여 전부하 조건에서 연료조성과 엔진 회전수에 따른 토크와 출력 특성을 Fig. 2 (a)에 나타내었다. 토크는 연료조성에 관계없이 2200RPM 에서 최대였고, 호주산이 최대 150Nm 였으며, 모든 엔진

회전수 조건에서 연료조성에 따라 많은 차이를 보였다. 또한, 출력은 연료조성에 관계없이 3400RPM 에서 최대였으며, 호주산이 최대 48kW 정도로 발생되었다.

Fig. 2 (b)에 연료조성 및 엔진 회전수에 따른 출력 발생특성을 Ref. gas 로 표준화하여 나타내었다. 출력은 호주산을 제외한 모든 연료가 엔진 회전수에 관계없이 기존 수입연료보다 떨어지는 특징을 보인다. 또한, 저 회전영역과 고 회전 영역에서 연료 조성에 따라 많은 차이를 보였으며, 이집트 산이 최대 9% 정도 떨어진다. 전부하에서의 이러한 특성은 WI(Wobbe Index)에 영향을 받는 것으로 보인다. 즉, 전부하 영역에서는 연료의 조성에 따른 발열량의 차이가 엔진의 성능에 가장 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.



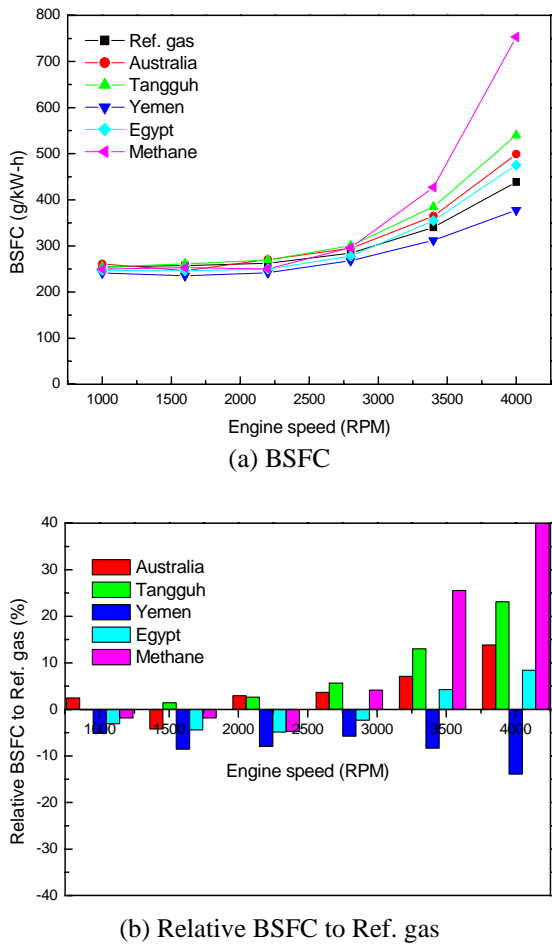
(a) Power and Torque characteristics



(b) Relative power to Ref. gas

Fig. 2 Effect of fuel composition and engine speed on power and torque at WOT

### 3.2 부분 부하 영역에서의 연비 특성



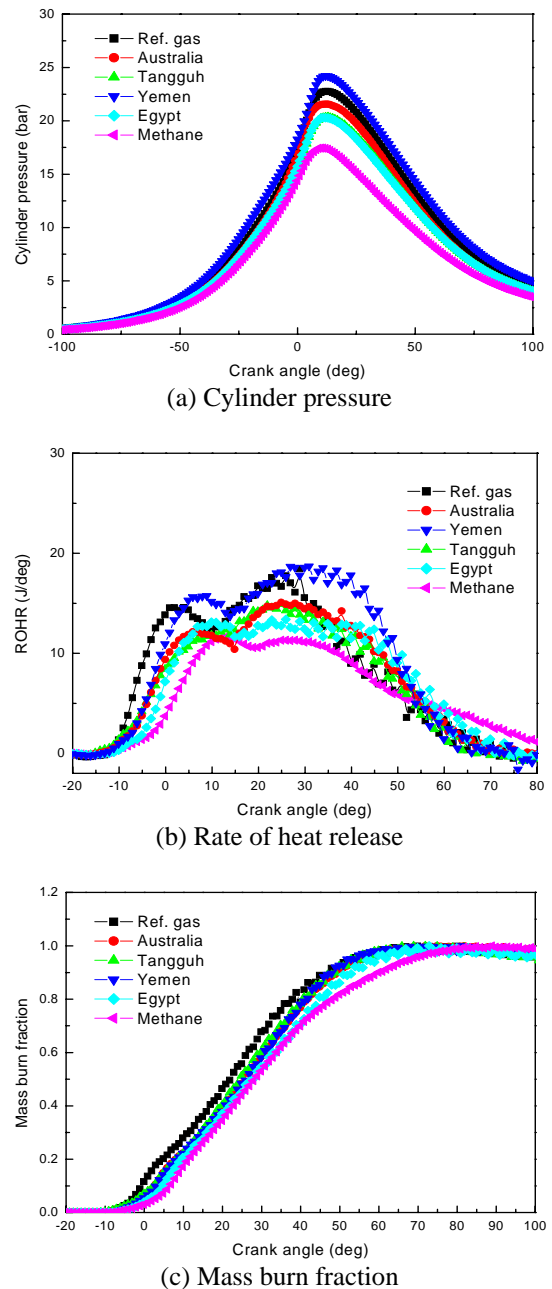
**Fig. 3** Effect of fuel composition and engine speed on BSFC at partial load

엔진은 전부하 조건에서 운전되는 경우는 거의 존재하지 않고 부분부하(Partial load)에서 운전되기 때문에 전부하 보다는 부분부하 특성이 실제 차량 운전에서는 중요하다. 따라서, Fig. 3 (a)에 부분부하 영역에서 연료조성 및 회전수가 연료소모율에 미치는 영향에 대해 나타내었다. 연료소모율을 나타낸 이유는 전부하 조건에서 보는 바와 같이 엔진 회전수에 따른 엔진의 최대출력은 WI에 비례함을 보인다. 운전자들은 연료조성이 바뀌었을 때 같은 출력으로 차량을 운전하기 위해 엑셀레이터를 더 밟게 되어 연료의 소비를 증가 시킨다. 따라서, 부분 부하에서의 연료 소모율은 가장 운전자들에게 민감한 사항이다.

Fig. 3 (a)에서 엔진의 회전수가 증가함에 따라 연료조성에 관계없이 연료소모율은 증가되었고, 예멘산이 가장 좋은 연비특성을 보였다. 또한, 순수 메탄은 3400 과 4000RPM 에서 급격히 증가하

는 특성을 보였다. Fig. 3 (b)에 나타난 바와 같이 2800RPM 이하에서는 Ref. gas 와의 연비 차이가 약 10% 이하로 나타났고, 2800RPM 이상에서는 순수 메탄을 제외한 연료에서 최대 20% 이상 차이를 보이고 있기 때문에 조성의 변화에 따라 차량 운전자에게 불만 요인이 될 수 있다. 이러한 특성은 MBT(Maximum Brake Torque)가 기존 가스에 맞춰져 있기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

### 3.3 부분 부하 영역에서의 연소 특성



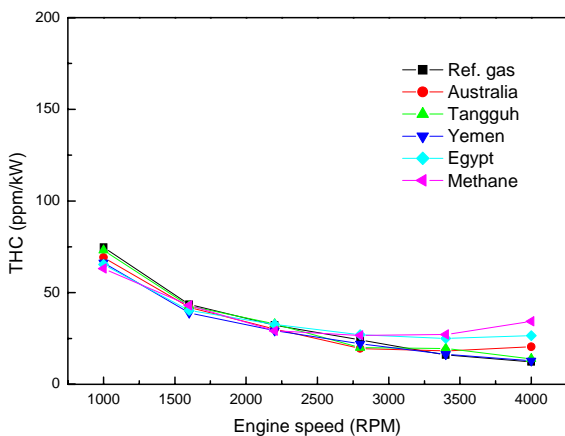
**Fig. 4** Effect of fuel composition on combustion at partial load and 2200RPM

부분 부하 영역에서 연비의 차이가 생기는 원인을 파악하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 연소실 압력을 100 cycle 측정하여 평균하여 나타내었고, Fig. 4(b), (c)와 같이 열발생율과 질량 연소율을 계산하였다. 연소 압력은 Fig. 4(a)와 같이 예멘산이 가장 크게 나타났고, Ref. gas, 호주, 탕구, 이집트 그리고 순수 메탄 순으로 나타났다. 예멘산과 기준가스를 제외하면 WI 값에 비례한다.

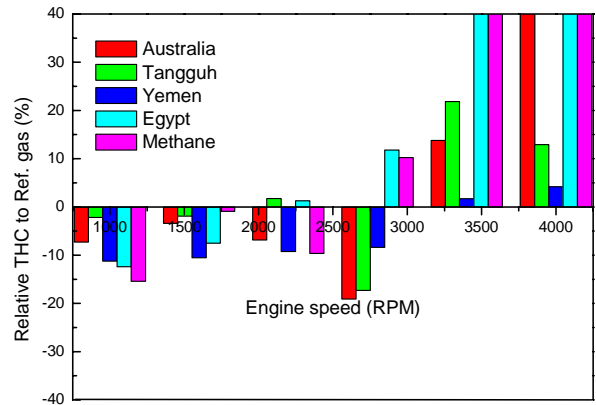
열발생율은 Fig. 4 (b)에서 보는 바와 같이 IDI(Indirect Injection)엔진을 개조한 것이기 때문에 쌍봉의 형태를 가진다. 또한, Ref. gas의 열발생율은 급격히 상승한 후 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 점화시기가 기준 가스 기준으로 정해져 있기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 그러나 예멘산의 경우 열발생율이 급격히 증가하지는 않으나, 다른 연료 조성과는 다르게 ATDC(After Top Dead Center) 20° 이후에 증가한다. 이러한 이유로 인하여 최대 압력이 발생하고 연비도 증가한 것을 사료된다.

Fig. 4의 (c)는 열발생율을 기조로 하여 질량연소율을 계산한 결과이다. 열발생율 특성과 마찬가지로 Ref. gas의 질량 연소율이 급격히 증가하며, 순수 메탄의 경우가 질량 연소율이 낮음을 볼 수 있다. 이러한 연소특성을 통하여 연료조성이 전부하 영역에서 보다 부분부하 영역에 영향을 주었고 점화시기가 연소 특성에 가장 중요한 인자로 사료된다. 또한, 엔진의 연소 성능에 영향을 미치는 인자는 WI 값 외에도 많은 인자가 있음을 알 수 있었고, 추후 정적연소기 실험을 통하여 강제 점화 엔진의 성능에 영향을 주는 연소속도를 연료 조성에 따라 측정할 예정이다.

### 3.4 부분 부하 영역에서의 배기 특성



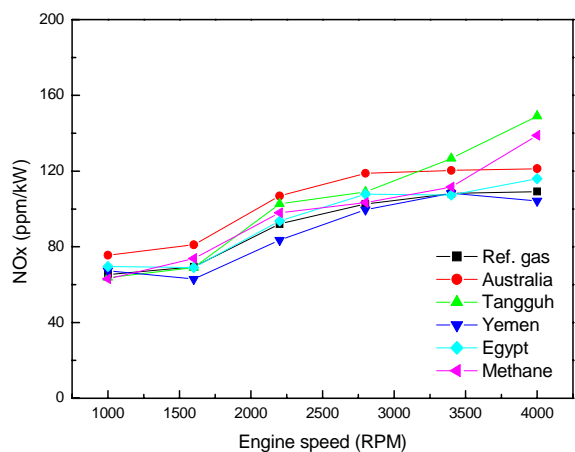
(a) THC emission



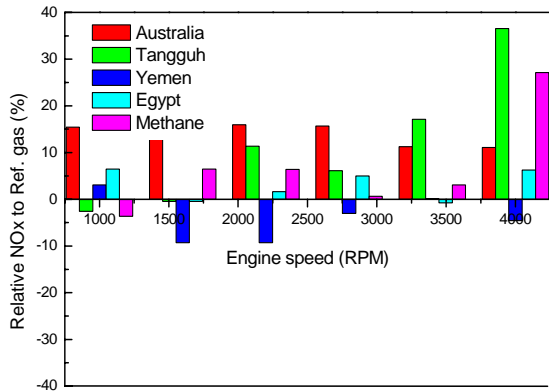
(b) Relative THC to Ref. gas

**Fig. 5** Effect of fuel composition and engine speed on THC emission at partial load

Fig. 5 (a), (b)는 부분 부하 영역에서 THC 발생 특성을 나타낸 결과이다. 엔진 회전수가 증가하면 연료조성에 관계없이 연소가 활성화되어 감소되나 연료조성에 따른 THC의 발생 비는 엔진 회전수가 상승됨에 따라 증가한다. 엔진 회전수 2200RPM 이하에서는 Ref. gas가 단위 출력당 발생하는 THC 양이 가장 많았고, 3400RPM 이상에서는 가장 적게 발생함을 보였다. 부분 부하에서 단위 출력당 발생하는 THC 농도는 연료조성과는 무관하고 점화시기에 민감하게 나타나는 것으로 사료된다.



(a) NOx emission characteristics



(b) Relative NOx to Ref. gas

**Fig. 6** Effect of fuel composition and engine speed on NOx emission at partial load

Fig. 6 (a), (b)는 부분 부하 영역에서 NOx 발생 특성을 나타낸 결과이다. 엔진 회전수가 증가하면 연료조성에 관계없이 NOx 는 연소가 활성화되어 증가하고, 연료조성에 따른 NOx 의 발생양은 엔진 회전수에 무관함을 보인다. 또한, 예멘산을 제외한 모든 연료에서 Ref. gas 보다 단위출력당 NOx 농도가 증가되었고, 연소온도와 관련된 WI 가 가장 큰 호주산이 가장 많이 발생하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 간접분사식 디젤 엔진을 개조한 CNG 엔진을 이용하여 부분부하에서 연료조성이 엔진에 미치는 영향을 평가하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 전부하(WOT) 영역에서는 WI(Wobbe Index)값이 증가할수록 엔진의 성능은 향상됨을 보였다.

2) 부분부하(Partial load)에서의 연비 성능은 예멘산이 가장 좋은 결과를 보였으며, 2800RPM 이하에서는 Ref. gas 와의 연비 차이가 약 10% 이하로 나타났고, 2800RPM 이상에서는 순수메탄을 제외한 연료에서 최대 20%이상 차이를 보이고 있기 때문에 연료조성의 변화에 따라 차량 운전자에게 불만 요인이 될 수 있다.

3) 부분부하에서 연소 특성은 예멘산이 가장 큰 연소압력을 보였고, Ref. gas 의 질량연소율이 가장 컸다. 이는 MBT(Maximum Brake Torque)가 Ref. gas 에 맞춰져 있고, 연료조성에 따른 발열량도 차이가 있기 때문에 연소에 영향을 주는 인자들의 복

합적인 영향으로 사료된다.

4) 부분부하에서의 배기 특성도 연소 특성과 마찬가지로 WI, 연료조성, 점화시기 그리고 연소속도 등의 인자에 복합적으로 영향을 받았음을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 2006 년 한국가스공사의 연구비 지원으로 수행되었으며, 관계기관에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) David, P., 1996, "Northern Lights Bright Prospects for Natural Gas Vehicles in Canada, *Natural Gas Fuel*
- (2) Kubesh, J., King, S. R. and Liss, W. E., 1992, "Effect of Gas Composition on Octane Number of Natural Gas Fuels", *Trans. of the SAE paper 922359*, pp.35~41
- (3) Lee, Y and Kim, G., 1999, "Effect of Gas Compositions on Fuel Economy and Exhaust Emissions of Natural Gas Vehicles", *Trans of KSAE*, Vol. 7, No. 8, pp. 123~131.
- (4) Ryu, K. and Kim, B., 2006, "Development of Conversion Technology of a Decrepit Diesel Vehicle to the Dedicated Natural Gas Vehicle", *Trans of KSAE*, Vol. 14, No. 6, pp. 73-81.
- (5) Min, B., Kim, H., Park, S. and Chung J., 1999, "The Effect of Composition of Natural Gas on the Raw Hydrocarbon Emissions for CNG Engine", *Trans of KSAE*, Vol. 7, No. 4, pp. 1-9.