

## CNG/LPG Bi-fuel 승용차의 배출가스 특성

조종표\* · 이영재 · 김강출 · 권오석

한국에너지기술연구원 산업효율연구센터

### Exhaust Emissions Characteristics of Bi-fuel CNG/LPG Passenger Cars

Chongpyo Cho\* · Youngjae Lee · Gangchul Kim · Ohseuk Kwon

Industrial Energy Efficiency Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received 8 September 2010 / Accepted 4 October 2010)

**Abstract** : Compressed natural gas (CNG) is well known as one of the cleanest burning alternative fuels. Bi-fuel CNG vehicle can also run on gasoline or another fuel while dedicated natural gas vehicle is designed to run on natural gas only. Recently, increased attention has been focused on bi-fuel CNG/LPG taxi because of good fuel economy of CNG. A number of LPG taxis modified to CNG Bi-fuel vehicles are running in many cities. In this paper, the emissions characteristics of in-use passenger cars running on CNG and LPG were investigated. Chassis dynamometer test was used to measure exhaust emissions from an in-use fleet of 5 cars. Exhaust emissions were collected for CVS-75 driving mode. The test results showed that for CNG fuel mode, CO, CO<sub>2</sub> and NMHC emissions decreased to 9%, 12% and 14% respectively, and CH<sub>4</sub> and NO<sub>x</sub> emissions increased to 317% and 47% respectively.

**Key words** : Alternative fuel(대체연료), CNG(압축천연가스), LPG(액화석유가스), Bi-fuel(바이퓨얼), Exhaust emission(배출가스), Chassis dynamometer(차대동력계)

#### 1. 서론

최근 도심의 환경문제 해결을 위한 대기질 개선과 지구온난화에 대비한 온실가스 배출량 감축 노력과 관련하여 자동차산업에도 많은 대책을 요구하고 있다. 수송 분야의 에너지사용량에 따른 온실가스 배출량은 국내 온실가스 배출량의 18%에 이를 정도로 많은 부분을 차지하고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 문제들에 대한 대책으로 연비향상 및 오염물질 저감을 위해 희박연소엔진 및 대체연료 사용을 위한 엔진 개발, 그리고 이들 엔진에 적합한 후처리 장치 개발 등이 활발히 진행되고 있다.

한편, 최근의 유가상승은 연료비가 비교적 저렴한 경유 자동차뿐만 아니라 LPG 자동차 운전자들

에게도 연료비에 부담을 가중시켰고, 운전자들로 하여금 연료비 절감을 위한 다양한 방법들에 관심을 갖게 하였다. 그 중에서 LPG/가솔린이나 CNG/가솔린뿐만 아니라 CNG/LPG Bi-fuel 차량에 대한 관심도 증가하고 있다.

특히, CNG/가솔린 및 CNG/LPG Bi-fuel 차량의 등록된 숫자는 아직 많지 않지만, 2009년 5월 925대(승용차 기준)에서 2010년 5월 1763대로 90% 증가할 정도로 근래에 크게 증가하고 있다.<sup>2)</sup> CNG는 옥탄가(130)가 매우 높은 대체연료로써 노킹(knocking) 없이 보다 높은 압축비를 얻을 수 있고, 배출가스를 저감하면서 희박연소를 할 수 있는 장점 등이 있다. 또한 현재 도시가스에 붙는 개별소비세 및 판매부과금이 다른 자동차 연료에 비해 적고, 교육세는 면제되는 등의 이유로 상대적으로 연료의 소비자가격

\*Corresponding author, E-mail: cnsver@kier.re.kr

이 저렴하다는 데서 그 이유를 찾을 수 있을 것이다. 그러나 국내의 미흡한 CNG 충전인프라에 따른 충전시의 불편함과 수 백만 원에 이르는 초기 개조비용은 CNG Bi-fuel 차량의 큰 단점이기도 하다.

Bi-fuel에 대한 최근 연구 자료를 조사해 보면, CNG/가솔린 및 LPG/가솔린 Bi-fuel에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 깊이 있는 연구가 진행되었다.<sup>3-5)</sup> Catania 등<sup>3)</sup>은 Bi-fuel CNG/가솔린 엔진에서 연소전개 및 연소가스의 팽창과정을 특성화하기 위해 연료 구성, 엔진 작동조건 및 배출가스와의 연관성을 조사하였다. 연구자들의 이전 연구에 사용된 엔진의 압력조절기 및 인젝터를 교체하여 고압의 CNG 연료를 잘 전달하고 더 많은 연료를 분사할 수 있도록 개선하여 실험하였으며, 화염속도가 최대가 되는 조건에서 화염속도와 층류화염속도 사이의 비율이 회전수가 증가함에 따라 증가하는 것을 보이는 등 엔진 동작 변수들이 화염전파 변수들에 미치는 효과 등을 분석하였다. Stodart 등<sup>4)</sup>은 2대의 차량을 이용하여 가솔린 엔진을 근거로 한 CNG/가솔린 Bi-fuel 엔진 및 LPG/가솔린 Bi-fuel 엔진에 대해 차량의 배기성능을 시험하였다. 이들은 대체 연료를 사용함에 따라 보다 나은 배기성능을 얻을 수 있었으며, 보다 정교한 엔진 제어를 통해 촉매의 교체 없이 이러한 결과를 얻을 수 있다고 주장하였다. 또한 이들은 대체 연료를 통해 CO<sub>2</sub> 배출량을 상당히 저감할 수 있었다고 하였다. Shamekhi 등<sup>5)</sup>은 정상상태의 전 부하(full load) 조건이지만, 폭넓은 엔진운전 조건에서 CNG/가솔린 Bi-fuel 엔진의 성능 및 배기 특성을 실험하였다. 실험엔 Mazda B2000i Bi-fuel 엔진이 사용되었으며, CNG 연료를 사용함에 따라 가솔린에 비해 출력, HC 및 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소되는 반면 NO<sub>x</sub>가 증가하는 결과를 얻었다.

그러나 CNG/LPG Bi-fuel 차량에 대한 연구 자료는 찾아볼 수가 없었다. 국내 승용차 등록대수 중 LPG 차량의 등록대수는 14%(2010년 5월 기준)에 이를 정도로 LPG는 국내의 대표적인 대체연료라 할 수 있다. 국내에서 택시사업자들을 중심으로 CNG/LPG Bi-fuel 시스템에 대한 관심이 증가하고 있으나 아직까지 CNG/LPG Bi-fuel 차량에 대한 배출가스 특성과 관련하여 구체적인 조사 및 연구가

진행되지 않은 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 개조 및 운행되는 CNG/LPG Bi-fuel 승용차를 대상으로 LPG 연료 사용 및 CNG 연료 사용에 따른 배출가스 특성을 조사·분석하였다.

## 2. 시험장치 및 시험방법

### 2.1 시험장치

시험차량의 배기구에서 채취된 원시가스(Raw exhaust gas)를 실시간으로 분석하기 위하여 AVL사의 SESAM(System for Emission Sampling and Measurement) FTIR(Fourier transform infrared) 분광기를 이용하여 배출가스를 측정하였다. 본 연구에 이용된 FTIR 분광기의 주요 사양은 Table 1과 같다. FTIR 분광기는 제작시에 측정 가능한 성분들에 대해 보정되어 출시되며, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 및 NH<sub>3</sub>를 포함하여 25가지 성분들에 대한 측정이 가능하다.

CNG/LPG Bi-fuel 승용차에 대한 배기 배출량 측정은 희석된 배출가스를 분석하는 방법으로 진행되었다. 희석된 배출가스를 채취하기 위해서 Horiba사의 CVS(Constant Volume Sampler) 9100을 이용하였고, 배출가스 분석을 위해 MEXA 9200을 이용하여 CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> 및 THC를 측정하였다.

Table 1 Specifications of FTIR spectroscopy

Model	2030
Spectral resolution	0.5-128 cm <sup>-1</sup>
Reference laser	Helium-Neon
Detector	LN <sub>2</sub> -cooled MCT
Pressure transducer	MKS Baratron
Pressure for sample gas cell inlet	13-58 psia
Gas cell temperature	191°C

### 2.2 시험차량

본 연구에서 시험된 차량은 국내 2L급 LPG 승용차 중 CNG/LPG Bi-fuel로 개조된 택시를 대상으로 하였다. 시험차량들에 대한 연식, 누적주행거리 및 변속기 사양 등을 포함하는 세부적인 제원은 Table 2에 나타내었다.

트렁크에 설치된 고압의 CNG 탱크(약 200 bar)는 고압 솔레노이드 밸브가 장착되어 있고 연료 누설

Table 2 Specifications of the vehicles tested

No	Transmission	Year	Odometer	Make	Model
1	manual	2007	294,415	Kia	Lotze
2	manual	2007	224,476	Kia	Lotze
3	manual	2008	121,819	Hyundai	NF Sonata
4	automatic	2008	103,100	Kia	Lotze
5	manual	2007	289,127	Kia	Lotze

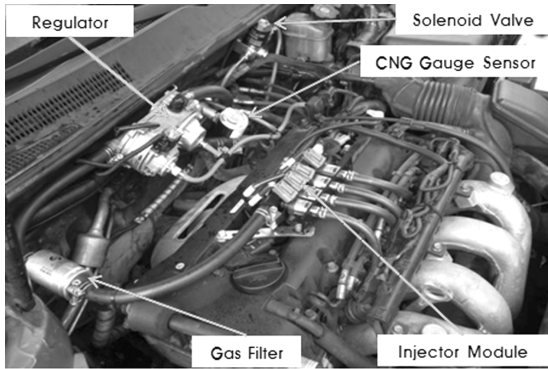


Fig. 1 CNG fuel rail installation

시 연료가 차단되도록 설계되어 있다. 고압의 CNG는 탱크에 연결된 스테인리스 관을 통해 전달되며, 엔진룸에 설치된 저압 솔레노이드 밸브와 압력 레귤레이터를 거쳐 대략 2 bar정도로 감압된다. 저압의 CNG는 Fig. 1에서 보이는 것처럼 고무호스로 연결된 4개 CNG 인젝터의 모듈을 통해 분사된다. 한편, 시험차량에 대한 전반적인 개조는 국내의 LPG 및 CNG 차량에 대한 개조 및 개발연구 등으로 잘 알려진 E사 및 I사의 기술을 통해 이루어졌다.

2.3 시험방법

모든 시험은 48인치 직경의 Single roll이 장착된 MAHA 차대동력계 상에서 이뤄졌으며, 공인연비시험방법과 동일하게 항온·항습조건에서 차량을 9시간 이상 유지시킨 후 냉간시동(Cold start) 조건에서 실시하였다. 시험차량에 대한 운전 사이클은 CVS-75 모드를 적용하였다.

3. 시험결과

3.1 실시간 주행모드에서 배기 특성

Fig. 2는 시험대상 차량 중 자동변속기를 장착한

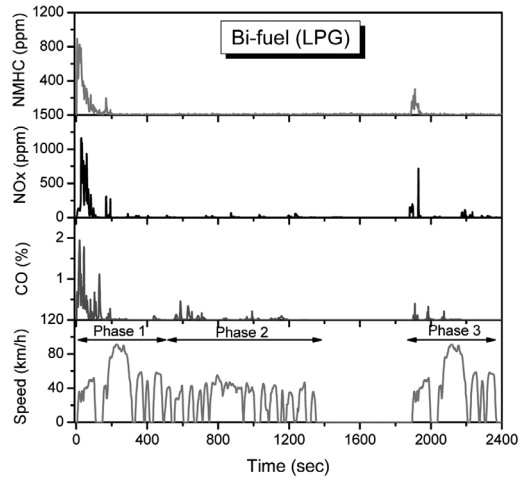


Fig. 2 Exhaust test results with LPG fuel mode

로체를 대상으로 LPG 연료를 사용하여 CVS-75모드를 주행하는 동안 FTIR 분광기로 배출가스를 실시간으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. Table 3은 모드 주행 시험에서 얻어진 배출가스의 총 배출량 및 Phase별 배출비율을 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 볼 수 있는 것처럼, LPG 차량의 배출가스 특성은 저온시동 초기 대략 200초 이내에 NMHC(Non-Methane HC), CO 및 NO<sub>x</sub>와 같은 오염물질이 다량으로 배출되는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 엔진 온도가 낮을 경우 시동성 향상을 위해 농후하게 연료를 공급하므로 CO와 THC가 증가하며, 엔진 시동시는 삼원촉매의 온도가 낮아 활성화되기 전이기 때문에 배출가스에 대한 정화율이 떨어진 다. 또한 Table 3에 정리한 것처럼, Phase별 배출량 분포를 보면 Phase 1에서 72% 이상의 오염물질이 배출되며, Phase 3의 고온 시동 초기에서는 오염물질이 상대적으로 적게 배출되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 모드 주행 시험에서 실시간으로 측정된 온실가스 성분만을 나타낸 것이다. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O

Table 3 Emissions rate at each phase for LPG fuel mode

구분	배출가스 배출량(g) 및 배출비율					
	CO	NMHC	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
총배출량	9.33	0.38	0.78	3109.5	0.15	0.17
Phase 1	79%	72%	82%	34%	50%	85%
Phase 2	14%	3%	4%	38%	8%	0%
Phase 3	7%	24%	14%	28%	42%	15%

는 대기환경보전법 및 제작자동차배출허용기준 등의 규제물질은 아니지만, CO<sub>2</sub>의 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potentials)를 1로 했을 때 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O는 각각 21과 310에 이를 정도로 지구온난화에 미치는 영향이 매우 큰 물질들로 알려져 있다. 2005년 기준으로 우리나라는 세계에서 13번째로 온실가스(CO<sub>2</sub> equivalent 기준)를 많이 배출하는 것으로 조사되었기 때문에,<sup>1)</sup> 2차 의무 공약기간에는 우리나라가 온실가스 감축대상국에 포함될 가능성을 배제할 수 없다. 이러한 세계적 흐름을 고려할 때 승용차에서 배출되는 온실가스의 배출특성을 살펴보는 것도 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 3에서 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O는 규제물질 배출가스 성분들과 유사하게 저온 및 고온시동 초기에 대부분 배출되는 것을 볼 수 있다. 특히 N<sub>2</sub>O는 저온시동모드인 Phase 1에서 85%가, 고온시동모드인 Phase 3에서 나머지가 배출되는 것으로 조사되었으며, 시동초기 100~200초에 집중적으로 배출되는 것으로 조사되었다.

Fig. 4는 동일한 시험차량에 대해 CNG 연료를 사용하여 배출가스를 실시간으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. Table 4는 이 주행 시험에서 얻어진 배출가스의 총 배출량 및 Phase별 배출비율을 나타낸 것이다.

CNG/LPG Bi-fuel 시스템은 시동시 LPG 연료를 사용하며, 엔진이 예열되고 안정화된 상태에 이르러서야 CNG 연료 시스템으로 전환된다. 본 연구의

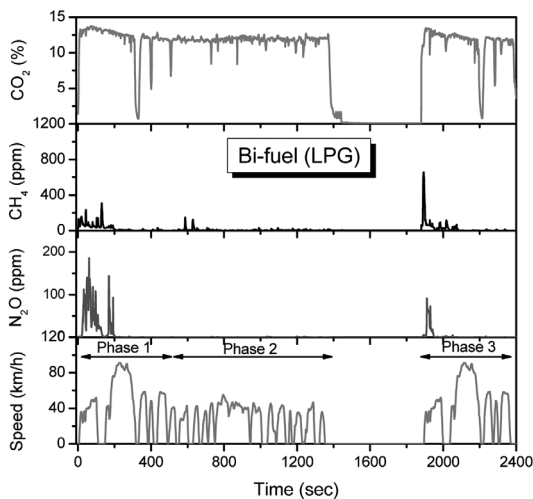


Fig. 3 Greenhouse gas emissions with LPG fuel mode

Table 4 Emissions rate at each phase for CNG fuel mode

구분	배출가스 배출량(g) 및 배출비율					
	CO	NMHC	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
총배출량	7.67	0.22	0.99	2536.9	0.49	0.12
Phase 1	94%	84%	65%	37%	16%	93%
Phase 2	4%	1%	21%	33%	23%	0%
Phase 3	2%	14%	14%	30%	61%	7%

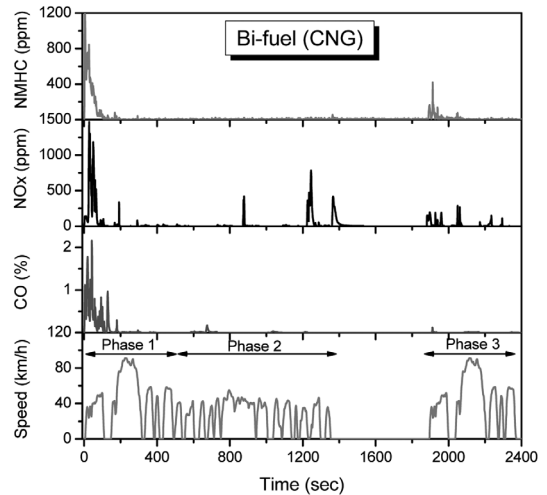


Fig. 4 Exhaust test results with CNG fuel mode

시험에 따르면 저온시동 시에 170~250초 정도 지나서 CNG 연료로 전환이 되었으며, 고온시동 시에는 5~23초 정도에 전환이 되었다.

CNG 연료 사용에 따른 Phase 1에서의 배출가스 특성은 LPG만을 연료로 사용했을 때와 경향은 대체로 유사하다. NMHC의 경우, 시동 초기 고농도의 배출가스 특성이 나타나긴 하지만 전체적인 배출량은 42% 정도 감소한 것으로 분석되었다. 또한 CO는 LPG 연료 모드에 비해 18% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 NO<sub>x</sub>는 Phase 1을 제외한 Phase 2와 Phase 3에서도 LPG에 비해 상대적으로 농도가 높게 나타나고 있다.

NMHC와 CO의 감소, 그리고 NO<sub>x</sub>의 증가는 삼원 촉매의 특성상 이론공연비보다 희박한 조건으로 제어되고 있는데 따른 것으로 판단되며, CNG 연료가 단위질량당 발열량이 상대적으로 높아 화염온도의 상승도 한 원인으로 판단된다.

Fig. 5는 CNG 연료 사용에 따른 CNG/LPG Bi-fuel 승용차의 실시간 온실가스 배출특성을 나타낸 것이

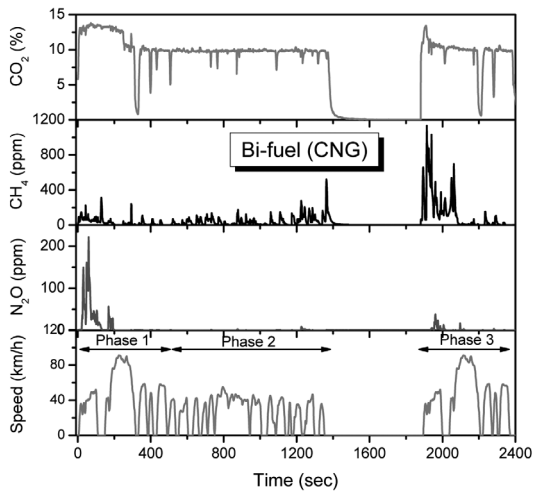
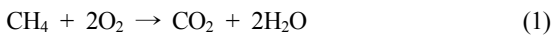


Fig. 5 Greenhouse gas emissions with CNG fuel mode

다. CH<sub>4</sub>의 경우, 농도는 높지 않지만 Phase 1과 Phase 2에서 지속적으로 배출되는 것을 볼 수 있으며, 특히 Phase 3의 고온 시동 이후에 다량으로 배출되는 것을 볼 수 있다. 저온 시동인 Phase 1에서의 CH<sub>4</sub>의 농도가 상대적으로 낮게 나온 것은 Bi-fuel 차량의 특성상 시동초기에 LPG를 사용하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 LPG 사용모드에 비해 CH<sub>4</sub> 배출량은 226% 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 CH<sub>4</sub>의 증가는 CNG 연료의 주성분인 CH<sub>4</sub>의 배출량 증가 및 삼원촉매의 CH<sub>4</sub>에 대한 낮은 정화율에 기인한 것으로 보인다. CNG 연료 사용에 따른 CH<sub>4</sub>의 증가는 앞으로 다가올 온실가스 저감대책에 대응하기 위해서도 CH<sub>4</sub> 저감을 위한 촉매 사용 등 기술적 대응이 필요하다고 할 수 있다. N<sub>2</sub>O의 경우, LPG 연료 사용모드와 유사한 배출가스 특성을 보였으며, 29% 정도 배출량이 감소하는 것으로 조사되었다.

CO<sub>2</sub>의 경우, 이 시험차량에 대해 CNG 연료를 사용함으로써 배출량이 18.4% 감소하였다.

한편, CNG 사용에 따른 이론적인 CO<sub>2</sub> 저감량은 다음과 같이 계산할 수 있다. CH<sub>4</sub>의 연소 반응식은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

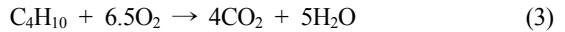


CH<sub>4</sub> (12+4) kg은 (12+2×16) kg의 CO<sub>2</sub>를 생성하며, 단위질량당 발열량을 아래 식 (2)와 같이 고려하면, 단위열량당 CO<sub>2</sub> 배출량을 계산할 수 있다.

$$16 \text{ kg} \times 50.0 \text{ MJ/kg} \rightarrow 44 \text{ kg CO}_2 \quad (2)$$

식 (2)로부터 단위열량당(MJ) CO<sub>2</sub> 배출량은 55g 이 된다.

유사하게 LPG(부탄 기준)에 대한 연소반응식은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.



$$58 \text{ kg} \times 45.7 \text{ MJ/kg} \rightarrow 176 \text{ kg CO}_2 \quad (4)$$

식 (4)로부터 단위열량당(MJ) CO<sub>2</sub> 배출량은 66.4g 이 된다. 따라서 이론적으로 CNG 연료를 사용함으로써 17.2% 정도 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소한다고 볼 수 있다. 그러나 겨울철에 사용되는 LPG 조성은 부탄이 70%정도이고 나머지 성분에 프로판이 상당 비율로 혼합되어 있다. 본 시험이 이뤄진 시기 또한 동절기에 해당하므로 이것을 고려하면 이론적인 CO<sub>2</sub> 배출량 감소비율은 더 작아진다. 또한 Bi-fuel 시스템의 특성상 시동 초기에 사용되는 LPG 사용량을 고려한다면 이번 주행시험 조건에서는 CO<sub>2</sub> 배출량 감소 비율이 더욱 더 작아진다고 할 수 있다.

따라서 이 비교 결과는 시험차량이 이론공연비보다 희박한 조건으로 제어가 되고 있는 것을 뒷받침한다고 볼 수 있다.

### 3.2 CNG/LPG Bi-fuel 운행차량의 배기 특성

국내에서 개조되어 운행되고 있는 CNG/LPG Bi-fuel 운행 승용차들에 대한 배기특성을 파악하고자 Table 2에 있는 목록의 차량을 대상으로 CVS-75 모드를 이용하여 배출가스 시험을 실시하였다. 시험은 개조된 직후 주행거리가 추가로 크게 누적되지 않은 상태에서 모든 시험대상차량을 대상으로 배출가스 시험을 진행하였다. 이후 약 3개월 정도의 평가기간 동안 누적주행거리 기준으로 적게는 2,200 km에서 많게는 21,000 km 주행 후, 동일 차량들을 대상으로 다시 배출가스 시험을 진행하였다.

이들 차량들 대부분은 비교적 엄격한 정비 및 개조절차를 거쳐 개조가 되었음에도 불구하고, 누적주행거리의 과다에 따른 보증기한 초과나 차량 관리자의 차량관리 상태에 따라 배출가스 시험결과가 다소 상이하게 나타날 수 있다. 또한 본 연구에서는 CNG/LPG Bi-fuel 운행 승용차의 배기특성을 조사하

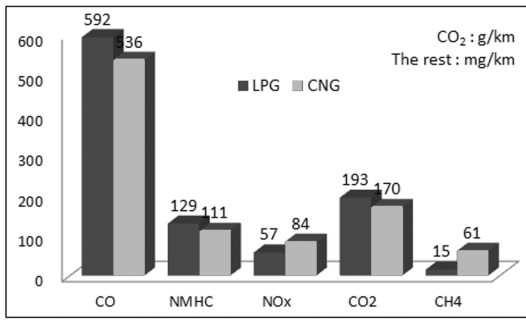


Fig. 6 Average exhaust emissions for CNG/LPG Bi-fuel vehicles

는 것이 목적이므로 이들 시험차량에 대한 평균적인 시험결과를 통해 국내 CNG/LPG Bi-fuel 운행 승용차의 배기특성을 살펴보고자 하였으며, 이에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

CNG 연료를 사용함으로써 평균적으로 CO, NMHC 및 CO<sub>2</sub>의 배출량은 각각 9%, 14% 및 12% 감소하는 것으로 조사되었다. 그러나 NO<sub>x</sub> 및 CH<sub>4</sub>의 배출량은 LPG에 비해 각각 47% 및 317% 증가하는 결과를 보였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내에서 CNG/LPG Bi-fuel 승용차로 개조되어 운행되고 있는 택시를 대상으로 모드주행시험에서 실시간 배출가스 측정 및 차대동력계 상에서 배출가스 시험을 통해 CNG 및 LPG 연료 사용에 따른 배출가스 특성을 조사하였다. 이에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 모드주행시험의 실시간 배출가스 특성분석에서 CNG 연료 사용시 LPG만을 연료로 사용했을 때와 시동 초기의 경향은 대체로 유사하였으나, NO<sub>x</sub>의 배출량은 증가하고 CO, NMHC 및 CO<sub>2</sub> 배출량은 감소하였다. 이것은 CO<sub>2</sub>의 이론적인 배출량 분석 및 삼원촉매의 특성을 통해 이론공연비보다 희박한 조건에서 제어되고 있음을 보였

다. 한편 CNG 연료모드에서 CH<sub>4</sub>는 크게 증가하며, N<sub>2</sub>O는 다소 감소하였다.

2) 국내에서 운행되고 있는 CNG/LPG Bi-fuel 승용차를 대상으로 한 차대동력계 상의 배출가스시험을 통해 CNG 연료 사용시 평균적으로 CO, NMHC 및 CO<sub>2</sub>의 배출량은 각각 9%, 14% 및 12% 감소하는 것으로 조사되었으며, NO<sub>x</sub> 및 CH<sub>4</sub>의 배출량은 LPG에 비해 각각 47% 및 317% 증가하는 것으로 조사되었다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(무·저공해자동차사업단)의 지원으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) CO<sub>2</sub> Emission from Fuel Combustion, IEA, 2008.
- 2) [http://stat.mltm.go.kr/portal/jsp/cate/flist\\_view.jsp](http://stat.mltm.go.kr/portal/jsp/cate/flist_view.jsp)
- 3) A. E. Catania, D. Misul, E. Spessa and A. Vassallo, "Analysis of Combustion Parameters and Their Relation to Operating Variables and Exhaust Emissions in an Upgraded Multivalve Bi-fuel CNG SI Engine," SAE 2004-01-0983, 2004.
- 4) A. Stodart, I. Aitchison and J. Lapetz, "Emissions Performance of Bi-fuel CNG and Bi-fuel LPG Passenger Cars Using Sequential Multi-point Injection Systems," SAE 2001-01-1195, 2001.
- 5) A. Shamekhi, N. Khatibzadeh, A. H. Shamekhi, "Performance and Emissions Characteristics Investigation of a Bi-fuel SI Engine Fuelled by CNG and Gasoline," Proceedings of ICES2006, ASME, pp.393-400, 2006.