



HCNG 버스의 연비와 CO₂ 배출특성

†한정옥 · 김용철 · 이영철

한국가스공사 가스연구원

(2017년 1월 2일 접수, 2017년 4월 24일 수정, 2017년 4월 25일 채택)

Fuel Consumption and CO₂ Characteristics of HCNG Bus

†JO Han · YC Kim · YC Lee

Research Institute of KOGAS

1248 Suinro, Ansansi, Gyeonggi-do, 15328, Korea

(Received January 2, 2017; Revised April 24, 2017; Accepted April 25, 2017)

요약

압축 천연가스에 수소를 혼합한 HCNG 연료를 사용하는 HCNG 버스에 대해 WHVC 차량시험 결과를 토대로 연료 경제성 및 CO₂ 배출특성을 분석하였다. 동급 CNG 버스 및 디젤버스 시험결과와 비교하여 HCNG 버스의 연비 개선효과와 CO₂ 저감효과를 고찰하였다. CO₂ 배출특성은 탄소배출계수에 따른 연료효과와 연비에 의한 효과로 분석하였다. 분석결과 HCNG 버스는 CNG 버스 보다 연비는 11.5% 개선되었고 디젤버스와는 동등수준을 보이는 것으로 나타났다. 또한 CO₂ 배출 특성으로 HCNG 버스는 CNG 버스에 비해 20.4% 개선효과가 있고 디젤버스에 비해 34.5% 향상되는 것으로 분석되었다. 이산화탄소 배출특성은 연료성분에 따른 탄소배출계수와 엔진성능에 따른 연비에 영향을 받는 것으로 귀결되었다.

Abstract - For the HCNG bus using fuel which is the mixture gas of hydrogen and natural gas, the fuel efficiency and CO₂ emission characteristics were analyzed based on the WHVC test results and compared with that of the CNG and diesel buses. CO₂ emission characteristics were also analyzed by contribution effects such as carbon emission factor and fuel consumption. As a result, the fuel economy of HCNG bus was evaluated to be 11.5% improvement compared to CNG bus, and it was also showed equivalent to diesel bus. In addition, the CO₂ emission of HCNG bus was reduced 20.4% and 34.5% compared to CNG bus and diesel bus respectively. It was concluded that the CO₂ emission characteristics were influenced by the carbon emission factor depending on fuel composition and the fuel consumption according to the engine performance.

Key words : HCNG, refueling, hydrogen, CNG, EURO6, CO₂, fuel consumption

1. 서론

HCNG는 천연가스에 수소를 혼합한 가스를 말하며 천연가스와 수소의 특성을 복합적으로 가지고 있다. 즉, 수소 혼합으로 천연가스에 비해 연소속도가 빨라지고 가연한계를 크게 확장할 수 있는 장점이 있다. 천연가스와 비교하면 가연범위가 넓어짐으로

희박한계를 넓힐 수 있고 EGR 범위를 확대시킬 수 있음으로서 연소온도를 낮춰 질소산화물을 근본적으로 저감시킬 수 있다. 또한 연료의 내 노킹 특성이 우수하여 압축비를 증가시켜 엔진 효율을 향상시키는 효과도 기대할 수 있다. 본 연구에서는 국내에서 개발된 HCNG 버스 및 연료 충전시스템에 대한 실증운전과 배기성능 인증시험 결과를 토대로 HCNG 버스의 연비성능과 CO₂ 배출 특성을 소개하고자 한다.

†Corresponding author:johan@kogas.or.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

II. HCNG 자동차 기술현황

2.1 HCNG 버스 및 충전시스템

Fig. 1에 보이는 HCNG 버스는 KIMM(한국기계연구원)에서 개발된 HCNG 엔진을 탑재한 차량으로 자일대우버스에서 제작하였다. HCNG용 엔진은 EURO6 CNG 엔진을 기본 모델로 하고 요소부품을 최적화 한 것으로 HCNG 연료의 내 노킹특성으로 압축비를 10.5에서 12.0으로 변경하였으며 이론공연비 방식을 적용하여 연소성능을 개선하고 3원 촉매를 통한 배출가스 성능을 최적화하였다. 수소의 빠른 연소속도와 넓은 연소범위 특성을 이용하여 배기 재순환(EGR) 비율을 높임으로서 질소산화물 생성을 억제하는 기술을 적용한 것이 특징이다. 적용된 연료용기는 수소취성을 고려하여 type4 용기를 탑재하였다. 아직 자동차관리법에 근거한 검사가 이루어지지 않아 시험용으로 운행하는 상태이다.

HCNG 연료를 공급하기위해 수소를 생산할 수 있는 개질시스템과 CNG 연료와 수소를 혼합할 수 있는 혼합장치를 설치하여 실시간으로 정해진 혼합비율을 공급할 수 있는 충전시스템을 구축하였다[1, 2]. 이 시스템은 HCNG 뿐만 아니라 수소를 공급할 수 있는 복합충전소이다. 수소혼합비율은 체적비율로 30±2% 수준으로 정밀하게 CNG 연료와 혼합하여 차량 연료용기에 200기압으로 충전할 수 있도록 구성하였으며 CNG 충전조건과 유사한 시스템 이다.

2.2 시험차량 및 연비산출방법

HCNG 버스의 연비특성을 비교하기 위해 Table 1과 같이 HCNG 버스와 동급의 EURO6형 CNG 버스를 시험하였으며 동급 성능을 가진 디젤버스의 시험자료와도 비교하였다. 시험은 국제모드인 WHVC(World Harmonized Vehicle Chassis dynamometer test)모드에 대해 측정하였으며 이 결과를 기준으로 분석하였다.

자동차 연비를 측정하는 방법은 직접 연료사용량을 측정하는 방법과 배출가스로부터 탄소평형법을 적용하는 방법 등이 알려져 있으며 국제적으로 탄소



Fig. 1. Developed HCNG Bus(290PS).

평형법이 많이 쓰이고 있다[3]. 이는 환경규제로 인한 정밀한 배출가스 분석이 요구되고 있기 때문에 이 결과를 활용하여 연비를 산출하는 방법이다.

혼합 연료조성을 갖는 HCNG, CNG 자동차의 연비를 산출하기위해 탄소평형관계식을 적용하였다. 천연가스 조성은 Table 2와 같이 국내 공급되고 있

Table 1. Specifications of tested vehicles(HCNG, CNG, Diesel)

Items	HCNG Bus	CNG Bus	Diesel Bus
Displacement	11 liter	←	←
Vehicle type	BS106	←	←
Fuel type	HCNG	CNG	Diesel
T/M type	Manual 5 steps	←	←
CVW(kg)	10,470	11,100	10,066
GVW(kg)	14,110	14,740	14,356
Tested inertia Weight(kg)	12,290	12,920	12,211

Table 2. HCNG, CNG compositions and heating values

Items	HCNG	CNG	Remark
C1	64.63	92.33	mol %
C2	3.44	4.91	
C3	1.22	1.75	
i-C4	0.27	0.38	
n-C4	0.29	0.41	
i-C5	0.01	0.02	
n-C5	0	0.00	
N2	0.14	0.20	
H2	30	0	
Sum	100	100	mol %
LHV, 0°C	30.41	38.87	MJ/Nm ³
LHV, 20°C	28.32	36.19	MJ/m ³
HHV, 0°C	33.93	43.06	MJ/Nm ³
HHV, 20°C	31.60	40.09	MJ/m ³
Carbon weight	9.295	13.279	kgC/kmol

는 대표조성을 적용하였으며 최근 열량 거래제도 도입으로 열량이 지역별로 고시되기 때문에 열량으로부터 조성을 예측하는 방법도 가능하다[4].

아래 관계식은 미국에서 천연가스 및 LPG 등 가스 연료에 사용되는 방법으로 국내의 천연가스 물성을 적용할 경우 사용이 가능한 것으로 알려져 있다[5]. 미국의 경우 2012년에 개정된 40 CFR 600.113-12에서 천연가스에 대한 연비 산출방법을 제시하고 있다. 미국은 20°C 상태의 값을 적용하고 있다.

$$\text{천연가스 자동차 연비(km/m}^3\text{)} = \frac{\text{CWF}_{\text{HC/NG,f}} \times \text{D}_{\text{NG,f}}}{(\text{CH}_4 \times 0.749 + \text{CO} \times 0.429 + \text{CO}_2 \times 0.273 + \text{NMHC} \times \text{CWF}_{\text{NMHC}})}$$

여기서,

- CWF_{NMHC} : 연료조성에 따라 결정되는 비 메탄 가스 연료성분의 CWF
- $\text{CWF}_{\text{HC/NG,f}}$: 연료조성에 따라 결정되는 메탄+비메탄가스 전체 연료성분의 CWF
- NMHC : 모드 운전시 배출가스 중 비 메탄 탄화수소 배출농도(g/km)
- $\text{D}_{\text{NG,f}}$: 20°C, 101.3kPa에서의 천연가스 밀도(kg/m³)

연료의 밀도와 탄소중량계수(CWF)는 연료가스의 물성이며 가스 조성으로부터 산출될 수 있는 물리량이다. 또한 배출가스 중 탄소와 관련된 성분, 즉 메탄(CH₄), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 및 탄화수소성분에 대한 배출농도를 측정하면 위의 관계식으로부터 연비를 산출할 수 있다. 수소가 포함된 HCNG 연료의 경우 탄소중량계수 계산시 연료 중에 수소성분을 고려해 주어야 한다. 연료종류별 밀도와 CWF는 Table 3과 같다. 온도와 압력 기준은 미국의 경우와 같이 20°C, 101.3kPa을 기준으로 하였다.

Table 3. Densities and carbon weighted fraction (CWF) of HCNG, CNG fuels based on Table2

Items		HCNG	CNG
Density (kg/m ³)	20°C	0.537	0.732
	0°C	0.577	0.787
$\text{CWF}_{\text{HC/NG,f}}$		0.720	0.756
CWF_{NMHC}		0.809	0.809

유럽의 경우 천연가스 차량의 연비는 2013년에 개정된 UNECE Regulation No. 101-Revision 3에 산출방법이 명시되어 있다. 연료밀도는 15°C 조건에서 정해진 시험연료(G20, G23)의 평균밀도(0.654 kg/m³)를 적용하고 있다.[6], 국내에서 공급되는 천연가스를 시험연료로 사용할 경우 유럽기준에서 제시한 밀도 값을 사용하는 것은 오차를 가져올 수 있다. 시험연료가 다를 경우 탄소평형 관계가 성립되지 않기 때문에 산출식 적용시 세심한 주의가 필요하다. 또한 HCNG 차량의 경우에 연비는 수소영향을 고려한 별도의 산출식을 적용하여야 한다.

III. 시험 결과

3.1 연비 산출

공인시험기관에서 측정된 배출가스 시험결과를 Table 4에 정리하였다[7]. WHVC모드로 측정된 결과로 천연가스는 국내 공급연료를 사용한 것이다. 단위 거리당 배출가스 성분으로 HCNG 버스의 경우 대부분 CNG와 디젤버스에 비해 양호한 것으로 보이며 CO의 경우를 제외하고 낮은 특성으로 보였다. CNG 버스의 경우 희박연소 조건에서 최적화가 이루어진 반면 HCNG 버스의 경우 높은 배기재순환 환경에서 이론 공연비 방식을 채택하여 최적화가 이루어져 배출가스 성분 간 배출 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다. NOx와 CO₂ 특성은 HCNG의 경우가 상당히 낮은 특성을 보이고 있다. 배출가스 결과로부터 미국의 연비 산출식(40 CFR 600.113-12)을 적용하여 연비를 계산한 결과 HCNG의 경우 2.89km/m³, CNG 버스의 경우는 3.31km/m³를 보여주었다. 여기서 단위 연료체적당 열량이 다르기 때문에 상대 비교를 위해 동등 열량을 기준으로 환산하면 HCNG의 경우가 102km/GJ이고 CNG의 경우는 91.5km/GJ로 계산된다. 이때 연료가스의 발열량은 CNG와 HCNG에 대해 20°C 상태를 기준으로 각각 36.19 MJ/m³와 28.32MJ/m³이다.

Table 4. Emission results of CNG, HCNG and Diesel buses by WHVC mode

(단위: g/km)

Items	THC	CH ₄	CO	CO ₂	NOx
HCNG	0.36	0.32	1.86	485.7	0.08
CNG	0.77	0.72	0.01	610.3	0.84
Diesel	0.034	-	0.05	741.1	0.77

Table 5. Comparison of fuel consumption among vehicle types(HCNG, CNG, Diesel)

Items	fuel consumption		Calorific value(LHV) MJ/m ³ , MJ/l*
	km/m ³ , km/l*	km/GJ	
HCNG bus	2.89	102.0	28.32
CNG bus	3.31	91.5	36.19
Diesel bus*	3.59*	102.8	34.92*

이상의 결과를 Table 5에 정리하였으며 디젤버스의 연비와 비교하기 위해 동급차종의 연비 결과[8]를 표에 추가하였다. 디젤버스의 경우 CNG 버스와 같은 11리터급이며 EURO6를 만족하는 버스이다. 디젤연비는 국내의 “자동차의 에너지 소비효율 및 등급표시에 관한 규정”에서 제시된 산출식을 적용하여 얻은 결과이다.

위의 결과에서 열량 기준으로 한 연료원별 연비는 HCNG 버스가 디젤버스와 동등 수준을 보였으며 CNG보다 11.5% 높은 것을 알 수 있다. HCNG 버스의 연비 특성이 디젤과 동등 수준을 보임을 알 수 있으며 이는 압축비 증가에 의한 효율향상 효과와 공차중량 감소에 따라 설정중량이 CNG버스에 비해 630kg 낮아진 효과로 판단된다.

3.2 도로주행 연비

HCNG 충전시스템의 안정적인 연료공급과 HCNG 버스의 운행특성을 파악하기 위해 주행성능을 평가하였다. 도로 주행연비는 주행노선과 평균 주행 속도 및 주행조건에 따라 편차가 크게 나타나는 특징이 있으며 본 주행시험의 경우 연료충전 지역의 특성상 인천과 서울을 왕복하는 구간으로 약 2,700km를 운행하였으며 연료사용량은 1,046Nm³이다. 주행속도는 시내 주행조건과 시외조건이 포함되어 중저속 조건으로 볼 수 있으며 연비는 평균 약 2.6km/Nm³으로 산출되었다. 주행성능은 운전자의 경험을 토대로 평가한 결과 기존 CNG 버스에 비해 출력과 출발성능이 우수하다는 의견을 보였다.

3.3 HCNG 버스의 CO₂ 저감효과

HCNG 연료의 또 다른 이점은 CO₂ 저감 능력으로서 수소의 혼합율이 높을수록 그에 비례하여 CO₂가 저감된다. CO₂ 또한 온실가스 감축정책에 따라 저감해야하는 물질로서 연비향상 기술과 아울러 탄소 성분이 적은 HCNG 연료의 장점을 살펴볼 필요

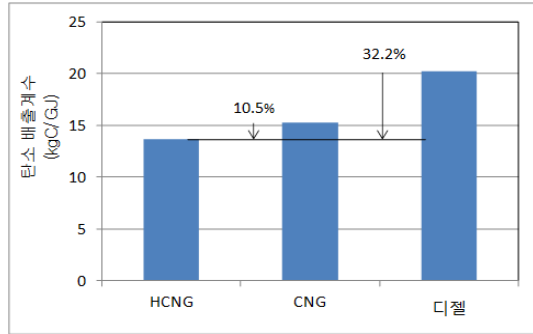


Fig. 2. Comparison of carbon emission factor and reduction rates(based on IPCC).

가 있다.

CO₂배출 특성은 연료의 저탄소 특성과 엔진의 효율 특성이 합쳐진 결과이다. 연료의 저탄소 특성은 연료별 탄소 배출계수를 통해 비교할 수 있다. HCNG의 탄소배출계수는 연료의 탄소분자량(9.295kgC/kmol)과 순발열량(30.4MJ/Nm³)으로부터 13.7kgC/GJ로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \text{HCNG의 탄소배출계수} &= \\
 & \text{탄소분자량} / \text{순발열량} / 22.4 * 1000 \\
 & = 9.295 / 30.4 / 22.4 * 1000 \\
 & = 13.7 \text{ (kgC/GJ)}
 \end{aligned}$$

한편 CNG와 디젤의 경우는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)[9]의 탄소배출계수 15.3과 20.2 kgC/GJ을 각각 사용하여 비교하면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 HCNG 연료는 CNG에 비해 10.5%, 디젤에 비해 32.2% 탄소배출이 저감되는 특성을 보인다.

Fig. 3은 실제 배출가스 실험 결과로 CNG와 디젤 대비 각각 20.4%와 34.5%가 저감되는 결과를 보였다.

CNG 버스 대비 HCNG 버스의 CO₂ 저감효과는 앞에서 살펴본 바와 같이 크게 연료자체의 저탄소 특성에 의한 결과와 연비향상에 따른 효과로 설명할 수 있다. 즉, HCNG 버스의 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 연료특성으로 10.5%의 저감이 기대되고 Table 5에서 분석된 것처럼 CNG 버스 대비 11.5%의 연비 개선 효과가 나타난 만큼 전체 적으로 22.0%의 저감효과가 기대된다. Fig. 3에 비교한 측정 결과는 20.4%로 기대치에는 다소 못 미치지만 전체 CO₂ 저감 분을 저탄소 연료 효과와 연비 향상 효과로 구분하는 것은 타당성 있으며 이들을 비율로 환산하면 48%와 52%가 된다. Fig. 4에 CNG버스 대비 HCNG 버스의 CO₂ 저감 특성을 저탄소연료 특성

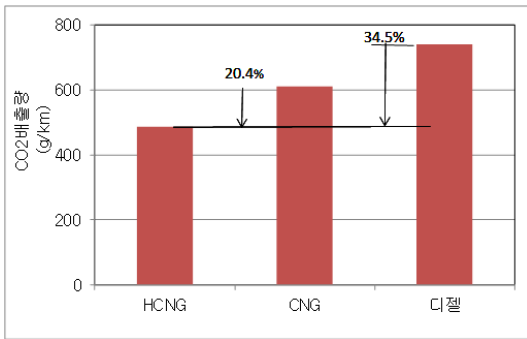


Fig. 3. Comparison of CO₂ emissions among tested vehicles(HCNG, CNG, Diesel) and reduction rates.

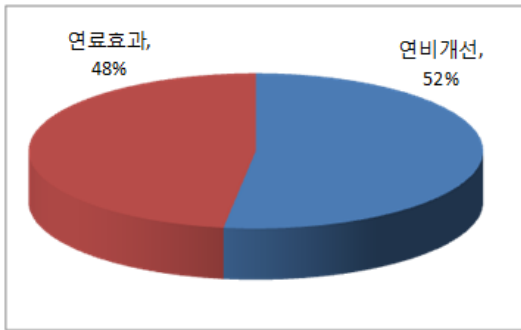


Fig. 4. Analysis of contribution effect on CO₂ reduction when converted from CNG bus to HCNG bus.

(48%)과 연비개선(52%) 효과로 표시하였다. 디젤버스 대비 HCNG 버스의 경우 연비 특성은 동등한 수준을 보였으며 대부분 저탄소 연료특성 효과(32.2%)가 CO₂ 저감효과(34.5%)에 반영된 것으로 보인다.

IV. 결론

천연가스 자동차는 지금까지 대도시 대기 질 개선에 많은 기여를 하여 왔다. 본 논문에서는 제작자동차의 배출가스 허용기준이 점차 강화되기 때문에 이에 대응하기 위한 차기 기술로 HCNG(천연가스 와 수소 혼합연료) 버스에 대한 실험 결과를 연비와 CO₂ 측면에서 조명하였다. 차기 배기규제인 EURO7 을 De_xNO_x 촉매 없이 만족할 수 있으며 더욱이 미래의 에너지인 수소의 사회적, 기술적 인프라의 교류역할을 할 수 있는 간접효과도 거둘 수 있어 기술

적 가치는 매우 높다고 할 수 있다.

시내버스를 중심으로 천연가스 자동차가 보급된 국내의 경우, 관리가 용이한 인프라가 잘 갖추어져 있다는 점과 높은 수준의 엔진기술력을 바탕으로 HCNG 자동차 상용화 기술력을 확보하고 있다. 보급을 위해 기술적 검증과 보급 효과에 대한 면밀한 분석을 통해 보급정책을 수립할 필요가 있다.

개발된 HCNG 버스와 EURO6를 만족하는 CNG 및 디젤버스에 대해 WHVC모드로 측정된 배출 가스로부터 연비와 CO₂ 배출특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) HCNG 버스의 연비는 102.0km/GJ로 동일 열량기준으로 CNG 버스 대비 11.5% 개선되고 디젤버스와는 동등 수준을 보였다. HCNG 버스의 연비 개선은 CNG 버스의 압축비를 증가(10.5 → 12.0)시킨 효과와 type 4용기 적용에 따른 공차중량 감소로 설정중량이 CNG버스 대비 630kg 낮아진 효과에 기인하는 것으로 보인다.

2) HCNG 버스의 CO₂ 배출은 485.7g/km로 CNG 버스 대비 20.4%, 디젤버스 대비 34.5%의 개선효과가 있는 것으로 분석되었다.

3) CNG 버스를 HCNG 버스로 전환시 CO₂ 저감 효과는 저탄소 연료 효과와 연비 개선 효과로 나눌 수 있으며 비율은 연료전환 효과가 48%, 연비 개선 효과가 52%인 것으로 판단된다. 디젤버스를 전환할 경우는 연비는 동등 수준이므로 연료전환에 의한 효과가 대부분인 것으로 보인다.

사용 기호 및 약어

- HCNG : hydrogen(30 vol%) mixed with CNG
- CNG : compressed natural gas
- G20 : CH₄ 성분이 100% 인 시험가스
- G23 : CH₄(92.5%)과 N₂(7.5%)로 조성된 시험가스
- LHV : lower heating value
- HHV : higher heating value
- CWF : carbon weighted fraction

감사의 글

본 연구는 2011~2016년도 환경부 친환경자동차 기술개발 사업단의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Project Report, "A Development of Engine and Fueling Station for HCNG Fueled City Bus", KOGAS, 2016
- [2] SM Kim, JS Lee, JO Han, YC Kim, YC Lee, JM Chae, SH Hong, "High Pressure Refueling Method for HCNG Gas Supply", KIGAS, vol 18, No. 1, 2014
- [3] DW Lee, JM Chae, JO Han, "Recommended Practice for Measuring the Fuel Economy of CNG Vehicles", KIGAS Proceeding, Nov., 2015
- [4] YC Ha, SM Lee, JY Her, KJ Lee, SJ Lee "Separation, Thermodynamic ; Correlations between the Important Physical Properties of Natural-Gas", Korean Chemical Engineering Research, Vol.47 No.5, 2009
- [5] 40 CFR 600.113-12, "Fuel economy, CO₂ emissions, and carbon related exhaust emission calculations.", www.ecfr.gov
- [6] UNECE regulation No 101- revision3, Annex6. "Method of measuring emission of CO₂ and fuel consumption of vehicles powered by an IC engine only", www.unece.org
- [7] JO Han, YC Lee, JS Lee, YC Kim, HT Kim, YA Cho, JM Chae "Analysis of Economical and Environmental Benefits for HCNG bus", KIGAS Proceeding, Nov., 2016
- [8] Test Report, "Performance of EURO6 Diesel Bus", ZYLE DW BUS, 2015
- [9] IPCC(intergovernmental panel on climate change)/ publications and data/supporting data/emission factor database, <http://www.ipcc.ch>