

천연가스 개조 승용차에 대한 실험적 연구(1) - 연비, 배기 및 주행 성능

김형구¹⁾ · 김인옥²⁾ · 엄인용³⁾

서울과학기술대학교 NID융합기술대학원¹⁾ · 서울과학기술대학교 에너지환경전문대학원²⁾ ·
서울과학기술대학교 기계·자동차공학과³⁾

Experimental Study on Natural Gas Conversion Vehicle(1) - Fuel Economy, Emission and Roadability

Hyung-Gu Kim¹⁾ · Inok Kim²⁾ · Inyong Ohm³⁾

¹⁾Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

³⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology,

Seoul 139-743, Korea

(Received 7 May 2015 / Revised 15 May 2015 / Accepted 26 May 2015)

Abstract : In this study, the roadability, fuel economy and emission characteristics were evaluated for a natural gas converted vehicle. The results are as follows; Not only the shortage of power was observed in stall test, but also large deterioration of acceleration performance was exposed in roadability. Compared to the original LPG system, the acceleration is 76% in start acceleration and 45 ~ 65% in overtaking acceleration, especially the decline became larger when air conditioner is at work. Furthermore, because the mapping data, which controls the injection depending on driving condition, do not match up with injection system, the failure of air-fuel ratio feedback control occurs resulting from the large gap between the required and the really supplied amount of fuel. This failure cause the exhaust gas to emit without catalytic conversion and the fuel economy based on the fuel heat value to get worse 22% in the mode test and 16% in road test respectively. In addition, the existing injection system does not secure enough fuel at the starting so that it may lead to the fail of cold start, the deterioration of hot start and inharmonic of engine at the idle after start.

Key words : NG(천연가스), Fuel economy(연비), Emission(배기), Roadability(주행성능)

Nomenclature

A : frontal projected area, m²
 HCR : hydrogen-carbon atomic ratio
 P : power at wheel, ps
 P_e : power at engine, ps
 R : road load, kgf
 R_a : air resistance, kgf
 R_r : rolling resistance, kgf

V : vehicle speed, km/h
 W : vehicle weight, kgf
 μ_a : air resistance coefficient
 μ_r : rolling resistance coefficient
 η_t : transmission efficiency

1. 서론

최근 석유를 비롯한 화석연료 자원의 고갈문제는 세일 가스, 오일 샌드의 본격적인 생산과 풍부한 매

*Corresponding author, E-mail: iyohm@seoultech.ac.kr

장량이 확인된 NG(natural gas, 천연가스)의 증산 등으로 더 이상 논란의 대상이 되지 않으며, 지구 온난화에 관련한 이산화탄소 배출문제가 보다 심각한 문제로 다가오고 있다.

한편 메탄이 주성분인 NG는 운송 및 인프라 구축이 어렵고 비용이 많이 든다는 가스 연료 고유의 단점을 가지고 있어 석유보다 채취 및 사용의 역사가 짧지만, 풍부한 매장량이 확인되었고 비교적 연료 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있어, 석유 자원의 고갈 문제가 대두되기 시작한 70년대부터 본격적인 개발이 시작되면서 운송 및 보급의 인프라가 꾸준히 개선되어 연료로서의 비중이 높아지고 있다.

NG의 도입 초기에는 주로 산업용 및 가정용으로 사용되었고, 현재에도 이 부분이 주된 용도이지만, 최근 대도시의 대기 환경 질 개선과 이산화탄소 배출량 억제가 크게 주목을 받음으로써, NG를 자동차용 연료로 사용하고자 하는 많은 시도가 있었다.

해외에서 NG를 자동차용 연료로 사용하고자 하는 시도는 완성차 업체보다는 애프터마켓에서 개조용으로 보급하는 것이 주를 이루고 있다. 대부분 NG 전용이 아닌 액화석유가스(LPG, liquified petroleum gas)와 겸용으로 사용되는 변환키트(conversion kit)를 보급하며, 변환키트의 주요 내용은 인젝터를 포함한 연료 공급 계통을 가스 연료에 적합하게 제작한 것이다.

국내에서는 애프터마켓보다 정부의 정책에 의해 NG 자동차의 연구 개발과 보급이 이루어져 왔다. 명차리 등^{1,2)}은 정부의 지원을 받아 SULEV(super ultra low emission vehicle)을 만족시키는 NG 승용차를 개발하였다. 이 개발을 통해 NG를 자동차용 연료로 사용할 때 출력저하 문제, 산소 센서를 이용한 공연비 제어 문제 및 촉매 정화 효율 등이 문제점으로 지적되었다.

조태희 등³⁾은 수도권 대기 질 개선 정책의 일환으로 시내버스용 대형 터보과급 기관을 개발하였고, 이후 시내버스에는 모두 디젤 기관을 대체하여 NG 기관이 사용되었다.

이후 NG를 자동차용 연료로 사용하고자 하는 연구는 주로 대형기관에 적용하는 것을 목적으로 하고 있으며, NG의 단독 사용보다는 혼소 방식에 큰

관심을 기울이고 있다.

원상연,⁴⁾ 임기훈 등⁵⁾은 NG와 수소 연료를 혼합하여 연소하는 혼소 방식 기관의 특성을 조사하여 혼소에 의해 이산화탄소 배출 억제 및 유해 배기 배출이 저감됨을 보고하였다.

이상민,^{6,7)} 심주현,⁸⁾ 이옥재 등⁹⁾은 디젤 기관에 디젤과 NG를 혼소하는 방식을 사용하면 유해 배기 물질 발생을 억제할 수 있다고 보고하였다.

이상과 같이 대부분의 NG를 자동차용 연료로 이용하는 것에 대한 연구는 대형 기관에 주로 초점을 맞추어 왔으며, NG 전용 또는 혼소 방식에 관계없이 효율 향상과 배기 제어를 위해 연소 방식도 희박연소 방식을 채택하고 있다.³⁻⁹⁾

한편 2009년부터 CNG 개조가 시작되고 2012년에 일부 택시 업체에서부터 LPG 차량의 NG 개조가 시범적으로 시작되어, 소형 기관에도 NG 연료의 사용이 허용되었지만, 그 실효성에는 의문이 제기되고 있다.^{10,11)}

선행 연구를 통해 살펴보면 대부분의 연구는 과급방식의 디젤 기관을 대상으로 하여 NG 희박연소 방식을 채택하거나, 역시 희박연소 방식을 채택하면서 혼소를 통해 배기 저감을 목표로 한 것이고, 소형차용 가솔린 기관을 대상으로 한 연구는 매우 드물다.

특히 소형 가솔린 기관의 경우 과급 방식은 거의 없고, 배기 정화의 대부분을 촉매를 통한 후처리에 의존하고 있기 때문에, NG를 자동차용 연료로 사용하기 위해서는 선행 연구^{1,2)}에서 지적한 여러 문제 즉 출력 저하, 공연비 제어 및 배기 정화문제를 충분히 검토하여야 한다.

한편 NG는 다음과 같은 특징을 가지고 있기 때문에 이 부분도 자동차용 연료로 사용하고자 할 때 고려되어야 한다.

일반적인 연소 반응에서 탄소의 발열량이 수소보다 38% 높기 때문에, 연료 분자에 탄소의 수가 증가할수록 몰 당 발열량은 증가한다.

NG는 1개의 탄소원자에 4개의 수소 원자가 결합된 메탄이 주성분이므로 탄화수소 연료 중에서도 탄소 수가 가장 적고 탄소 당 수소의 수가 가장 크므로 다른 탄화수소보다 단위 몰(또는 부피) 당 발열

량이 현저히 낮아 1/2 ~ 1/4 수준이다. 따라서 기상으로 연료를 공급하는 경우, 모든 연소 시스템에서 동일 발열량을 구현하기 위해서 다른 기체 연료에 비해 2~4배 정도의 체적유량이 요구된다.

반면 연료 중 수소의 비율이 높아 분자량이 작기 때문에, 단위 중량 당 발열량은 모든 탄화수소 계열 중 가장 높은 수준으로, 상용의 다른 탄화수소 계열 연료에 비해 평균적으로 6~10% 정도 높으며, 또한 연료 중 탄소의 비율이 낮으므로 동일 발열량에 대해 이산화탄소의 발생이 적다.

내연기관은 한정된 연소실(실린더) 체적 조건 하에서 요구되는 출력을 만족시켜야 하므로, 연소에 적절한 연료-공기 혼합비(공연비)를 형성시킴과 동시에 충분한 연료의 발열량 확보를 위한 적절한 연료 공급 시스템 구축이 매우 중요하다.

액체 연료의 경우(LPG 액상분사 포함), 중량 당 발열량에 큰 차이가 없고 동시에 액상에서의 비중에 큰 차이가 없으므로, 연료 중 산소가 함유된 알코올 계 연료를 제외하면 연료에 따른 1회 분사 질량(공급량, 분사기간)에 큰 차이가 없고 실린더 내 총 충전 질량도 큰 차이가 없다.

반면 기체 연료(주로 C No. 1~4)를 공급하는 경우, 기체의 분자량(또는 탄소와 수소의 수)에 큰 차이가 있으므로, 동일 연료 중량 당 요구 공기 중량에는 큰 차이가 없지만, 동일 연료 부피 당 요구 공기 부피에는 큰 차이가 난다. 이론 공연비에서 실린더 내의 연료 체적은 NG는 29%, 부탄(기상 분사의 경우)은 13%이므로, 연료 체적은 NG가 부탄(기상 분사의 경우)의 2.23배이다. 따라서 NG를 연료로 사용하는 경우 총 충전 체적은 동일하더라도 연료 충전 질량은 부탄의 62% 정도이고, 발열량은 69% 수준으로 실린더 총 충전 질량 및 총 발열량이 감소하여 출력이 저하된다.

한편 NG 연료의 옥탄가는 가솔린보다 훨씬 높은 130 근방이다. 따라서 전부하 운전에서 노킹에 대한 저항력이 가솔린보다 매우 크기 때문에 통상적인 SI(spark ignition) 기관의 압축비범위를 넘어선 13.6에서도 노킹발생 점화시기(DBL, detonation border line)가 최적점화시기(MBT, minimum spark advance for best torque)보다 진각된 시기에 위치하므로 MBT

운전이 가능하다. 따라서 충전 발열량의 차이를 상당히 극복하여 최대 출력저하가 15%정도로 보고되었다.¹²⁾ 또한 압축비를 12.6으로 하는 경우 최대 출력의 저하는 5% 정도이지만 저중속 부근에서는 9% 정도로 보고되었다.¹²⁾

이러한 맥락에서 본 연구에서는 NG 개조차의 연비 및 배기 성능을 LPG 차량과 비교함으로써 이러한 문제점들이, 현재 국내 NG 차량의 개조에서 충분히 반영되었는지 검토하기로 한다.

2. 시험차량 및 시험 방법

2.1 차량

본 연구에서 사용된 NG 개조 승용차량은 액화석유 액상분사(LPLi, liquified petroleum liquid injection) 차량에 NG 변환키트를 장착하여 개조한 차량이다. 현재까지 국내에는 NG 전용 변환키트의 보급이 이루어지지 않은 상황이므로, 본 연구 대상인 차량은 시내버스 등과 같이 연료로 NG만 사용하는 NG 전용(mono-fuel) 시스템이 아니라, LPG와 NG을 기관의 상태 또는 연료 충전 여부에 따라 연료를 선택적으로 사용하는 이중연료(bi-fuel) 시스템을 채택하고 있다. 즉 시동과 시동 이후 냉각수 온도가 일정 수준(55°C)에 도달하기 전까지는 LPG 연료를 사용하고, 이후 NG 연료로 전환하게 된다.

변환키트는 2개의 연료 탱크(LPG 30L, NG 120L), NG용 저압(1.5bar) 인젝터, 이중연료용 ECU(electric control unit), 연료 게이지 및 제어 스위치로 구성되어 있으며 그 개념도를 Fig. 1에 나타내었다.

NG 개조차량을 평가하기 위하여 NG 개조차, LPLi 차량 및 가솔린 차량 등 3대의 차량을 비교 평가하였다. 이들 차량의 제원은 유사하며, NG 차량의 경우 용기에 의해 100kg 정도 가솔린과 LPLi 보다 무겁다. 다만 NG로 개조하면서 기관의 성능에 대한 평가가 이루어지지 않았으므로 개조 기관의 최대 출력과 토크는 특정할 수 없다.

2.2 실 도로 연비 측정

연비 평가는 완벽한 실험 장치를 갖춘 곳에서 숙련된 운전자에 의해 모드 연비를 평가하는 것이 가장 정확하고 또 차종 간의 비교가 가능하다. 실제 도

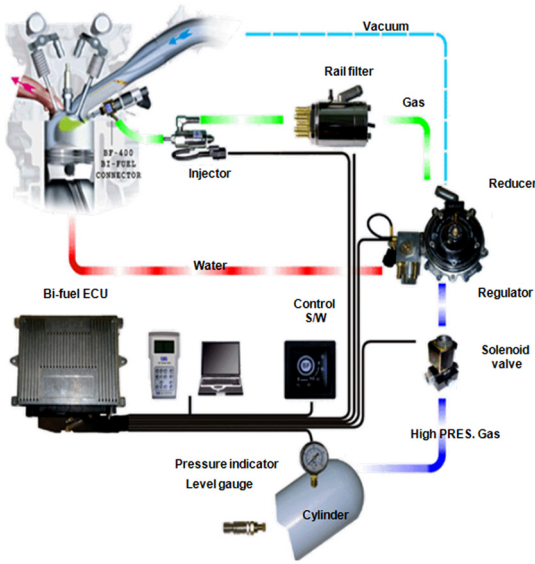


Fig. 1 Schematics of NG conversion kit

로 주행을 실시하면서 연비를 측정하는 경우 여러 문제점이 발생할 수 있고, 보정이 가능한 부분은 보정하여 연비를 산정하였다.

2.2.1 차량 길들이기

NG로 개조한 차량은 LPLi 중고 자동차를 개조한 차량이고, 차량 인도시 40,000km 이상 주행하였으므로 충분한 길들이기가 되어 있다. LPG차량은 NG 개조 차량과 동일한 차종이며, 차량 인도시 60,000km 이상 주행하였으므로 충분한 길들이기가 되어 있으므로 두 차량 모두 길들이기에 의한 오차는 고려하지 않았다.

2.2.2 차량의 주행 저항 및 에어컨 사용 영향

차량의 연료소비를 지배하는 인자는 주행저항, 운전 방법 및 변속비 등 여러 가지가 있는데, 기본적으로는 주행저항에 가장 큰 영향을 받는다. 주행저항에는 구름저항, 공기저항, 등판저항 및 가속저항이 있지만, 등판저항과 가속저항은 실 도로에서 평가가 불가능하므로 평탄로, 정속 주행을 가정하여 구름저항과 공기저항만 고려하였다.

또 하나 중요하게 고려해야 할 사항은 에어컨의 사용이다. 에어컨은 정상 주행 상태에서 기관의 출력에서 차지하는 부분이 무시할 수 없기 때문에 이의 사용 여부에 따라 연비는 크게 달라진다.

따라서 차량의 속도, 중량 및 에어컨의 사용에 의해 실제 차량 연비의 감소와 보상을 ① 에어컨 시스템에서 압축기가 최대 동력을 소비 ② 차량의 크기를 고려하여 압축기의 소요 동력을 1마력(ps)이라고 가정하여 다음과 같이 산출하였다.

차량의 주행저항과 이를 극복하여 차량을 주행시키는데 필요한 기관에서의 요구 동력은 차속에 따라 변한다. 이때 통상적으로 구름 저항은 차속에 관계없이 일정하다고 가정하므로 요구 동력이 변하는 원인은 공기저항의 변화에 따른 것이다. 또한 에어컨을 가동하는 경우 에어컨 압축기에서 소요되는 동력은 일정하지만, 주행 저항을 극복하기 위한 동력은 차속에 따라 달라지고, 이에 따라 기관에서 발생시키는 총 동력에서 압축기 구동에 필요한 동력이 차지하는 비율은 차속에 따라 달라진다. 일정 구간을 차량이 정속으로 주행하였다고 가정하면 주행 저항과 에어컨 사용의 영향은 다음과 같이 계산될 수 있다.

본 연구에서 사용한 차량의 중량은 NG의 경우 1540kgf 이고, LPG의 경우 1470kgf 이므로 주행 저항과 기관의 요구 동력은 다음과 같다.

먼저 NG 차량에서 구름저항은 1인 승차의 경우

$$R_r = \mu_r \times W = 0.01 \times 1605 = 16.05 \text{ kgf} \quad (1)$$

구름저항계수(μ_r)는 평탄 양호한 아스팔트에 적용하는 $\mu_r = 0.01$ 로 두었다. 차량 중량은 운전자를 포함하여 $W=1540+65=1605 \text{ kgf}$ 이고, 중량에 연료량, 적재물이 포함되어 있지만 평가할 수 없으므로 제외한다.

공기저항은

$$R_a = \mu_a \times A \times V^2 \quad (2)$$

공기저항계수(μ_a)는 세단형 승용차의 경우 0.001-0.002이며 이중 중간 값 0.0015로 가정하였다. 전면 투영면적(A)은 $A = H \times W \times 0.9 = 2.43 \text{ m}^2$ 이다.

구름 저항의 경우 차속과 관계없이 차량 중량에만 영향을 받으므로, 승차 인원 추가에 대한 보상만 실시하고, 공기 저항의 경우 중량과 관계없이 속도에 의해서만 영향을 받는다. 따라서 NG 차량의 평균적인 총 주행저항(R)은 다음과 같다.

Table 1 Example of compensation for driving distance according to number of passengers and air conditioner on-off

City	Road		Real distance (km)	Time (min.)	Average speed (km/h)	Passenger	A/C	Compensated distance (km)
	Highway	National						
10.5	52.6	0	63.1	10	65	1	Off	63.1
2.9	0	0	2.9	10	17	1	Off	2.90
3.4	0	0	3.4	14	20	2	Off	3.50
5.7	0	0	5.7	16	24	2	On	10.37
7.4	0	0	7.4	123	28	2	On	12.55
27.9	0	0	27.9	13	14	2	On	72.62
1.9	0	0	1.9	49	9	1	Off	1.90
10.5	51.6	0	62.1	28	76	1	Off	62.1
16.5	0	0	16.5	24	35	2	Off	16.85
13.4	0	0	13.4	30	34	2	Off	13.70
9.8	0	0	9.8	58	20	3	On	20.55
11.0	51.3	0	62.3	17	64	1	Off	62.30

$$R = R_r + R_a = 16.05 + 0.01 \times \Delta W + R_a \quad (3)$$

이를 이용해 구동륜에서 요구되는 구동 동력을 구하면 다음과 같다.

$$P = \frac{R \times V}{270} \quad (4)$$

기관에서 구동륜까지 동력전달계통의 전달효율을 고려하면 기관의 요구동력은 다음과 같다.

$$P_e = P / \eta_t \quad (5)$$

여기서 동력전달효율(η_t)은 0.9로 가정하였다.

LPG 차량의 경우도 위의 식 (1)~(5)의 과정을 거쳐 요구동력을 계산하였다.

실 도로 연비 측정 주행에서 NG 차량의 평균 차속은 45.0km/h이고 LPG 차량의 경우 55.8km/h이다. 평균 차속을 기준으로 할 때 에어컨 가동이 기관에서 발생시키는 동력에서 차지하는 비율은 NG 차량의 경우 23% 그리고 LPG 차량의 경우 16%이다. 그러나 주행 중 에어컨을 가동하지 않은 경우도 있고 차속에 따라서 에어컨 동력의 비율이 크게 달라지므로, 이를 고려해 구간 별로 세분하여 보상을 실시하였다.

보상의 방법은 에어컨 가동에 필요한 동력이 기관 총 동력에서 차지하는 비율을 계산하고, 에너지 보존에 의해 에어컨을 가동하지 않은 경우 에어컨 가동에 소요된 부분만큼 주행거리를 보상하였다. 또한 승차 인원 에 의한 구름 저항 보상도 에어컨 가동과 마찬가지로 에너지 보존을 이용하여 보상하였다. 이러한 보상의 예를 Table 1에 제시하였고, 제시되어 있듯이 차속이 낮을수록 에어컨 사용에 대한 보상이 증가하여 100%를 넘는 경우도 발생한다.

2.2.3 운행 구간 및 운행 거리

NG 개조 차량의 경우 실 도로 주행 연비를 측정하기 위하여 7,705km를 주행하였고, LPG 차량은 4,662km를 주행하였고, 운행 구간은 주로 고속도로와 자동차 전용도로로 구성되었고, 이외에 시가지 및 국도 운행 구간도 일부 포함되어 있다. NG와 LPG 차량의 주행에 대한 개요는 Table 2에 나타내었다.

2.2.4 연료량 측정 및 기타 오차 요인

실 도로 연비 산출에서 연비는 총 주행 거리를 총 충전량으로 나누어 산출하였고, NG 차량의 경우 42회

Table 2 Outline of road test

Vehicle	Road condition			Total distance (km)		Time (min.)
	City	Highway	National road	Real	Compensated	
LPG-NG	1928.4	4485.3	0	6413.7	7290.39	8250
NG only	553.9	738.2	0	1292.1	1534.52	2019
LPG	1,023.1	3565.7	73.2	4,662.0	5296.8	5,015

충전의 누적량 682.4 Nm³, LPG의 경우 14회 충전의 누적량 510 ℓ을 사용하였으므로, 충전량이 충분히 많아 연료량 측정에 의한 오차는 거의 없다고 판단된다.

도로 조건에 따른 주행 패턴 및 운전자 고유의 운전 습관도 연비에 영향을 주는 요인이므로, 비교 대상의 두 차량을 동일한 구간, 동일한 시간대에 대해 운행하여 오차를 최소화 하였다.

도로 상태 및 주행환경도 고속도로, 전용도로 및 국도 운행이 대부분이고 또한 도로 사정이 양호하므로 영향을 주지 않는 것으로 판단한다.

2.3 기타 차량 성능

NG 개조차량은 시동 특성을 파악하기 위해 -6°C에서 저온 시동과 60°C에서 고온 시동을 실시하였다. 그리고 가속 성능의 평가를 위해 다음과 같은 시험을 추가로 실시하였다.

2.3.1 스톱 시험

스톱(stall) 시험은 기관을 무부하 상태로 유지하고 제동을 한 상태에서 변속기를 주행(D) 상태로 두고, 스로틀을 급격히 개방하여 최고 회전수 및 최고 회전수까지 도달하는 시간을 측정하여 발진 및 가속 성능을 평가하는 방법이다. 기관의 출력이 낮을수록 최고 회전수가 낮고 도달 시간이 긴 반면 기관의 출력이 높을수록 회전수가 높고 도달시간이 짧다.

2.3.2 가속 성능

가속 성능은 도로 상에서 발진 가속 0→100 km, 추월 가속 60→80km, 80→100km에 대하여 실시하였고 추월 가속의 경우 에어컨 가동의 영향을 평가하였다. 발진가속은 변속기 1속에서 출발하여 기관의 회전수가 5000 rpm 이상에 도달한 경우 변속을 실시하였고, 추월 가속의 경우 3속으로 고정하여 실시하였다.

3. 시험 결과

3.1 모드 주행

NG 개조 차량은 이중연료 시스템이고, 시동과 냉간 운전(55°C) 중에는 LPG를 사용하지만, 모드 주행 시험에서는 NG 만의 영향성을 평가하기 위하여 NG

Table 3 Weighted exhaust gas of FTP-75 mode (g/km)

	NG	LPG	NG/LPG
THC	1.422	0.009	158
CO	14.891	0.146	102
NOx	0.001	0.016	0.06
CO ₂	150	165	0.91
CH ₄	0.584	0.002	292
NMHC	0.961	0.008	120

로 시동하여 운행하였다. 차대 동력계에서 FTP-75 모드 주행을 하고 배기가스를 분석하여, 이를 배출중량으로 환산한 결과를 Table 3에 제시하였다.

표에서 알 수 있듯이 NG 개조차는 THC, CO, NMHC(non-methane hydrocarbon)의 배출량이 규제치 보다 매우 높게 나오고 있다.

THC, CO, NMHC는 촉매에서 산화 반응을 통해 정화가 되는데, 배출량이 이와 같이 증가한 것은 촉매에서 산화반응이 발생하지 않았다는 것을 의미한다. 또한 환원 반응에 의해 정화가 되는 NOx의 배출이 오히려 LPG 보다 감소한 것을 고려하면, 촉매 입구에서 배기가스는 산소가 매우 부족한 상태임을 쉽게 유추할 수 있다.

이러한 현상을 모드 주행 중에 공연비 변화와 배기가스의 변화를 검토해 보자.

Fig. 2는 Phase 1에서 공연비(공기 과잉율 λ)와 배기를 나타낸 것으로 배기는 희석 터널 이후에 측정된 것이다. 공연비는 평균으로 λ=0.86 근방으로 매우 농후한 조건으로 운전되었음을 알 수 있다. 이에 따라 그림에서 알 수 있듯이 CO의 배출 농도가 매우 높아, 희석을 한 상태에서도 분석기의 측정 범위를 벗어나 일정량 이상에서는 포화된 상태로 나타난다.

모드 주행 중 공연비의 변화를 더 자세히 관찰하기 위해 Phase1, 2, 3에서 초기 150초 동안의 공연비와 차속을 Fig. 3에 도시하였다.

그림을 보면 모든 Phase에서 피드백 제어는 실현되지 않았고 주로 가속 구간과 고부하에서 공연비가 농후하다는 공통점이 있다.

이러한 공연비 특성은 기본적으로 다음과 같은 것이 원인으로 판단된다.

첫째, 기본적으로 NG 개조 차량의 EMS에서 연료 분사량에 대한 데이터가 이론 공연비에서 크게 벗

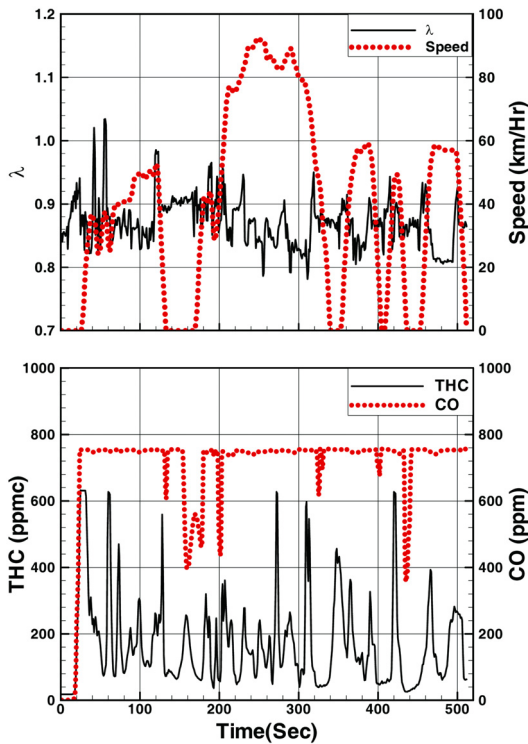


Fig. 2 λ and vehicle speed, THC and CO at phase 1

어나 농후하게 입력되어 있고, 이 편차가 제어 루프로 보정이 할 수 있는 범위를 벗어나 개방 루트로 작동한 것으로 판단된다.

둘째, 고부하나 가속 운전에서 공연비가 더 농후에 지는 것도 일차적으로 개방 루프에 원인이 있지만 추가로 가속 증량이 과도할 가능성도 있다. 또한 NG 차량의 출력이 낮기 때문일 수도 있는데, 출력이 낮기 때문에 가속과 고부하에서 스로틀 개도가 더 커야하고 이에 따라 운전 영역이 공연비 제어 영역을 벗어나 있을 수도 있다.

다른 특징은 냉간 시동인 Phase 1보다 온간 시동인 Phase 3에서의 시동 초기에 공연비가 더 농후한 것으로 보아 온도에 따른 연료량 보상은 없는 것으로 판단된다. 이것은 기본적으로 이중 연료 시스템에서 냉간 시동을 LPG로 하므로 NG 냉간에 대한 맵이 준비되지 않는 것으로 사료된다.

차대 동력계에서 모드 연비와 이산화탄소 배출량을 측정한 결과를 Table 4에 제시하였다.

NG의 주성분인 메탄의 발열량은 50.01 MJ/kg 이

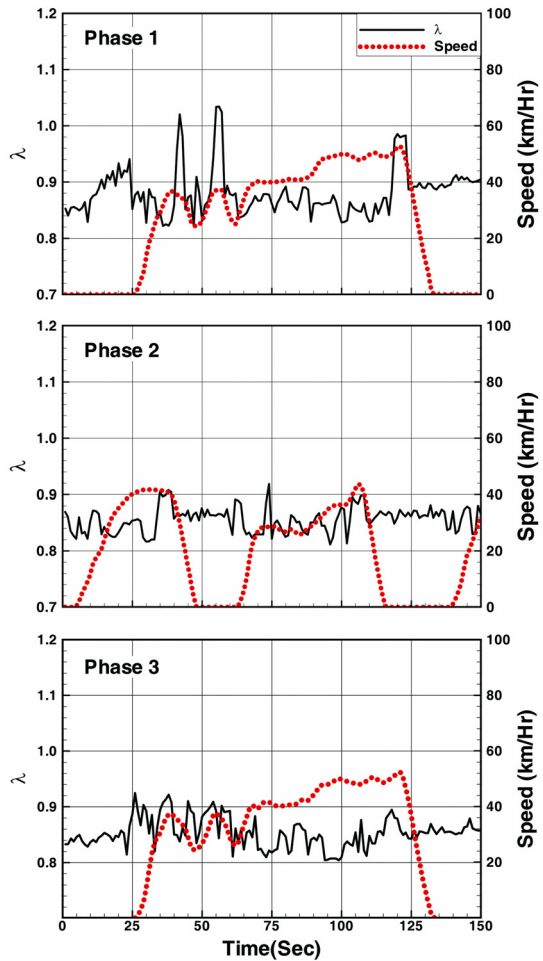


Fig. 3 λ and vehicle speed during initial stage of phases

Table 4 Fuel economy of FTP-75 mode

		NG	LPG
Fuel economy	kpl	9.4	10.7
	mpg	22.11	25.17
CO ₂ base	Fuel (km/kg)	18.439	18.356
	HV (km/MJ)	0.372	0.402
Emission base	Fuel (km/kg)	15.567	18.330
	HV (km/MJ)	0.314	0.401

지만 NG는 산지 별로 조성이 다르다. 공급처의 자료(CH₄ 89, C₂H₆ 7.8, C₃H₈ 2.1, C₄H₁₀ 0.38, C₅H₁₂ 0.4 및 N₂ 0.4% 이하)를 기준으로 하면, HCR = 3.87 이고 발열량은 49.54 MJ/kg 이다. LPG는 액상 분사를 하므로 부탄의 비율이 매우 높고 부탄과 프로판

의 발열량 차이가 거의 없으므로, 발열량을 부탄의 발열량 45.71MJ/kg 로 보았다.

우선 CO₂ 발생량만을 기준으로 한 경우 NG는 LPG의 165g에서 150g으로 9.1% 감소하였고, 단위 중량 당 연비는 NG의 경우 18.439km/kg, LPG는 18.356km/kg 이다. 중량 당 연비는 비슷한 수준이지만 앞서 논의한 바와 같이 NG 연료의 특성은 분자량이 작기 때문에 몰 당 발열량은 작지만 중량 당 발열량은 탄화수소 계열의 연료 중에서 가장 높은 수준이다. 따라서 이종의 연료를 비교할 때 단위 주행 거리 당 총 발열량을 비교하는 것도 의미가 있다. 이 경우 NG는 0.372km/MJ 로 LPG의 0.402km/MJ 에 비해 7.3% 연비가 악화된다.

이상과 같은 논의는 CO₂ 발생량만을 기준으로 한 것이고, 배기 분석 결과로 연료의 양을 계산할 때 CO 및 HC도 포함시켜 하는데, 대부분의 경우 매우 미량이므로 거의 영향을 주지 않는다. 그러나 NG 개조차의 경우 CO 와 메탄 그리고 THC가 대량으로 발생하였으므로 이를 고려하여 연비를 계산하면 중량기준으로 NG는 15.567km/kg 으로 18,330km/kg 인 LPG보다 15% 연비가 악화되었고 발열량 기준으로는 0.314km/MJ 로 LPG의 0.401km/MJ 에 비해 22% 정도 연비가 악화되었다.

이와 같이 NG에서 연비가 악화된 것은 다음과 같은 것이 원인으로 작용하였다고 판단된다.

첫째, 배기 특성에서 논의한 바와 같이 모드 주행 시 공연비 피드백 제어가 되지 않아 농후한 상태로 운전되었는데, 농후한 혼합기 상태로 운전 되는 경우, 연소 효율의 감소에 의한 효과가 기연가스 온도가 저하되어 비열이 감소하는 효과보다 더 크게 작

용하여 효율이 저하되기 때문이다. λ=0.85인 연료 공기 사이클 해석에 의하면 이론 공연비 대비 17% 정도 효율이 저하된다.¹³⁾

둘째, 이론공연비 근처로 운전하면 연료의 대부분은 연소효율은 거의 1에 λ=0.85 인 경우 미연 성분도 무시할 수 없는 수준이다. 연료 공기 사이클 해석도 미연성분은 없다고 가정할 경우이다. 모드 주행 결과에서 미연 성분은 전체 연료의 2.5% 수준으로 평가되는데, 이러한 저하 요인을 모두 합하면 약 20% 정도이고 이는 연료 발열량 대비 모드 주행 연비의 저하22%와 대체로 일치한다.

3.2 실도로 주행 연비

실제 도로를 주행하며 NG 개조차와 LPG 차량의 연비를 비교한 결과를 Table 5에 나타내었다. NG는 충전량(소비량)을 Nm³으로 나타내므로, LPG와 비교하기 위하여 단순히 주행거리를 연료량으로 나누는 것은 의미가 없다. 따라서 모드주행 연비 분석에서 사용하였듯이 발열량 당 주행 거리를 비교하는 것이 가장 타당한 방법이다.

발열량에 따른 비교를 통해 알 수 있듯이 NG 전용으로 주행한 경우 LPG와 비교하여 단위 발열량 당 연비는 실제 연비는 20%, 보상연비는 16% 정도 감소함을 알 수 있다. 이러한 NG 전용 모드에서 연비의 악화 수준은 모드 주행의 22%와 크게 차이가 나지 않으며, 실제 도로 주행의 여러 오차를 감안할 때 상당히 잘 일치한다고 볼 수 있다. LPG-NG의 이중 연료 시스템으로 주행하더라도 2~3%정도 연비가 악화되는데, 이 연비에는 LPG 사용이 고려되지 않음을 고려하면 저하 폭은 더 증가된다.

Table 5 Fuel economy of road test

		NG		LPG
		LPG-NG	NG	
Distance	Real	6413.7	1292.1	4,662.0
	Compensated	7290.4	1534.5	5296.8
Fueling (Nm ³ , ℓ)		551.4	131.0	510.3
FE (km/Nm ³ , km/l)	Real	11.63	9.86	9.13
	Compensated	13.22	11.71	10.38
FE (km/MJ)	Real	0.325	0.275	0.342
	Compensated	0.369	0.327	0.389

Table 6 Time for cold and hot start (sec)

	NG	LPG
Cold (-6°C)	Impossible	0.5
Hot (60°C)	More than 2 times cranking	0.2

3.3 기타 차량 성능

먼저 저온 시동의 경우 NG 연료로는 시동이 불가능하였다. 이는 앞에서 논의한 바와 같이 저온 상태에서의 연료 공급에 대한 보상이 없고, 동시에 시동에 필요한 연료량을 충분히 공급할 수 있는 저온 시동 증량이 맵이 부적절한 것이 원인으로 판단된다. 온간 시동의 경우도 크랭킹(cranking) 1회로는 시동이 불가능하며 2번 이상 크랭킹 후 시동이 가능하였다. 또한 시동이 된 이후에도 기관의 부조가 심하였는데, 이것도 아이들 상태에서 연료 공급량 및 점화 시기에 대한 맵핑데이터가 적절하게 입력되지 못하였고, 기통 간 분사량에 차이가 있는 것이 원인으로 판단된다.

가속 능력과 관련된 시험 결과를 Table 7에 제시하였으며, 먼저 스톱 시험에서 NG의 경우 최고 회전수는 1.4sec 경과 후 2281rpm이고, LPG는 1.2sec 경과 후 2593rpm에 도달하였다. NG 사용에 따른 출력 저하로 최고속도 도달 시간과 최고 속도 모두 약화됨을 알 수 있다.

도로 상에서 평가한 발전가속성능은 LPG 연료의 가속도는 1.92m/sec²이며 NG 연료를 사용한 경우 1.46m/sec²으로 감소하여 NG의 가속도는 LPG의 76% 수준이다.

60→80km의 추월 가속 성능은 에어컨을 가동하지 않은 경우 LPG 대비 3.1sec 더 시간이 소요되고 에어컨을 가동한 경우 이보다 더 늘어나 4.4sec에 이른다. 가속도 기준으로 볼 때 에어컨을 가동하지 않는 경우 LPG의 0.94m/sec²에서 0.62m/sec²로 감소하여 LPG의 66% 수준이다. 에어컨을 가동하면 LPG의 0.87m/sec²에서 0.50m/sec²으로 감소하여 LPG의 57% 수준으로 에어컨을 가동하지 않았을 때 보다 감소의 폭이 더 크게 나타난다.

마지막으로 80→100km 가속 성능도 60→80km 가속과 마찬가지로 NG 개조차의 성능이 크게 저하되는데, 그 저하 폭은 60→80km 가속보다 더 크게 나타난다. 즉 에어컨을 가동하지 않은 경우 LPG 대

Table 7 Acceleration performance test result

Stall Test				
Parameter	NG	LPG	NG-LPG	
Time (sec)	1.4	1.2	16.7% ↓	
RPM	2281	2593	12.0% ↓	
Road test				
A/C	Parameter	NG	LPG	
0→100	Time (sec)	19.0	14.5	
	a (m/sec ²)	1.46	1.92	
	NG /LPG (%)	76.3		
60→80	Time (sec)	9.0	5.9	
	a (m/sec ²)	0.62	0.94	
	NG /LPG (%)	65.6		
80→100	Time (sec)	11.2	6.4	
	a (m/sec ²)	0.50	0.87	
	NG /LPG (%)	57.1		
Off	Time (sec)	11.5	6.3	
	a (m/sec ²)	0.48	0.88	
	NG /LPG (%)	54.8		
On	Time (sec)	15.1	5.3	
	a (m/sec ²)	0.37	0.82	
	NG /LPG (%)	45.0		

비 5.2sec 더 시간이 소요되고 에어컨을 가동한 경우 이보다 시간이 크게 늘어나 차이가 8.3sec에 달한다. 가속도는 에어컨을 가동하지 않는 경우 0.88m/sec² (LPG)에서 0.48m/sec²로 LPG의 55% 수준이고, 에어컨을 가동하면 0.82m/sec²(LPG)에서 0.37m/sec²(NG)으로 감소하여 LPG의 37% 수준으로 역시 에어컨을 가동하지 않았을 때 보다 감소의 폭이 더 크게 나타난다.

에어컨 가동에 따라 NG의 가속 성능 저하가 더 심화되는 것은, NG 차량의 출력이 낮기 때문에, 에어컨 가동에 소비되는 추가적인 동력이 출력에서 차지하는 비중이 LPG 보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 즉 상대적으로 더 높은 부하조건에서 운전해야하므로 가속에 필요한 여유구동력의 상대적인 감소가 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

결과를 종합하면, NG로 차량을 개조하는 경우 출력의 저하에 의해 주행 성능 특히 가속 성능의 저하는 불가피하지만, NG 특유의 고옥탄가 특성을 활용하여 점화시기의 조절을 통해 저하 폭을 낮추는 것이 필요하다. 아울러 시동 및 냉간 운전에 대한 정밀

한 매핑이 요구된다.

가장 중요한 것은 공연비 제어의 실패에 의해 연비와 배기가 모두 개조 전보다 악화되었다는 것인데, 이는 분사 시스템에 대한 세밀한 검토가 부족한 것이 원인으로 판단되며, 이러한 맥락에서 후속 연구에서는 분사 시스템 성능에 대해 논의하고자 한다.

4. 결 론

NG 개조차의 주행 성능과 연비와 배기를 평가하는 시험과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모드 주행 결과 NG 개조차의 배기 수준은 현 배기규제를 만족시키지 못하는데, 이는 공연비 제어가 구현되지 않아 농후한 조건으로 운행되기 때문이다.
 - 2) 모드 주행에서 연비는 개조전보다 연료 발열량 기준으로 20%이상 악화되었는데, 이 역시 공연비 제어의 실패에 기인한다.
 - 3) 실도로 주행 연비도 개조전보다 연료 발열량 기준으로 14 - 17% 정도 악화되며, 이중 연료 시스템으로 운행하여도 연비는 악화된다.
 - 4) NG 개조차의 저온 시동은 불가능하였으며, 온간 시동에도 2회 이상의 크랭킹이 필요하다.
 - 5) NG 개조차의 가속 성능은 개조전의 45-75% 수준이며, 특히 에어컨을 가동할 때 성능의 저하가 더 크게 나타났다.
 - 6) 출력저하, 공연비제어 및 촉매 정화에 관련된 NG 적용 시 발생할 수 있는 여러 문제점들에 대한 대책이 개조시스템에서는 거의 반영되지 않았으며, 이는 연료공급시스템이 NG 연료의 특성에 부합하는 성능을 가지지 못했기 때문으로 판단된다.
- 2) K. Min, C. L. Myung, C. H. Chang and K. J. Yoon, "Development of HMC's Natural Gas Vehicle," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.187-193, 1994.
 - 3) T. H. Cho, B. H. Min, M. S. Choi and C. H. Kim, "A Development of a Heavy-duty Turbocharged and Intercooled CNG Engine for Urban Bus," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.482-487, 1997.
 - 4) S. Won, C. Park and C. Kim, "A Study on the Development of Hydrogen-natural Gas Dual Fuel Engine," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.156-161, 2010.
 - 5) G. Lim, S. Lee, C. Park, Y. Choi and C. Kim, "A Study on the Characteristics of Power Output for Hydrogen-natural Gas Blend Fueled Engine with Compression Ratio Change," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.121-123, 2012.
 - 6) S. Lee, G. Choi and O. Lim, "Research of Natural Gas/Diesel Dual Fuel Vehicle," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1040-1045, 2010.
 - 7) S. Lee and O. Lim, "Research of Natural Gas/Diesel Dual Fuel Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.20, No.5, pp.13-18, 2012.
 - 8) J. Sim, Y. Kwak, C. Ko, O. Lee, S. Lee and C. Lee, "A Study on Improvement of Diesel Substitution Ratio through Changing System of Mechanical Diesel Engine to Diesel-LNG Dual Fuel Engine," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.199-205, 2010.
 - 9) O. Lee, S. Lee, J. Sim, C. Lee, Y. Kwak and S. Yang, "A Study on the Emission Characteristics in Natural Gas/Diesel Dual Fuel Engine with Electronic Throttle Control," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.193-198, 2012.
 - 10) N. Jung, The Energy News, <http://www.energy-news.co.kr>, 2014.
 - 11) M. Choi, The Yeongnamilbo, <http://www.yeongnam.com>, 2014.
 - 12) Hyundai Motor Compay, Natural Gas Vehicle, Presentation, 2001.
 - 13) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp.181-182, 1988.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) C. H. Chang, K. Min, C. L. Myung and K. J. Yoon, "Development of Hyundai MPI CNG (Compressed Natural Gas) Engine," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.546-554, 1993.