

소형 SI 기관용 연료로서 가솔린과 LPG의 특성 비교에 관한 연구

조기현* · 백태실** · 정형길***

A Study on the Comparison of Characteristics of Gasoline and LPG for a Small SI Engine

K-H Cho* · T-S Baek** · H-K Chung***

Key words : Exhaust emission(배기배출물), Liquefied petroleum gas (액화석유가스),
BSFC(제동연료소비율), Gas temperature(가스온도), Compression ratio(압축비)

Abstract

This is a fundamental study to improve the performance of the LPG engine. The results were summarized as followed.

1. The measured torque and power on the fuel of LPG were indicated about 8% lower than those on gasoline with the same compression ratio.
2. In the case of LPG, BSFC at compression ratio of 9.7 was about 5% lower than that of 8.3 at 3,000rpm
3. HC and CO concentrations of the LPG were lower about 53%, 35% than those of gasoline

1. 서 론

최근 환경부에서는 저공해 차량에 대한 기관 개발에 역점을 두기 위해 배기량 800cc 미만의 경승용차와 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas) 차량에 대해 대기오염물질 배출기준을 강화해 2002년 7월부터 생산되는 차량에 적용할 계획이

라고 밝혔다. 환경오염의 문제가 인류의 생존을 위협함에 따라 종래의 배출가스 규제만으로는 대기오염을 막기 어렵다는 판단하에, 세계각국은 종전의 규제대상 범위를 확대 실시하는 방향으로 연구하고 있다. 미국은 이미 연방대기정화법 개정에 수반하여 미국환경보호청(EPA, Environmental Protection Agency)이 건설기계 및 농업기계 등의

* 경북도립 경도대학 차량기계학과(원고접수일 : 2000년 11월)
** 포항1대학 자동차과
*** 경상대학교 대학원

기관에 대한 배기가스 규제 법률제정을 서두르고 있으며, 캘리포니아주에서는 이들 차량에 대한 법률을 제정한 바 있다.¹⁾ 일본에서도 1999년 중반과 2000년대 초반의 두 단계로 나누어 점차적인 차량의 증가를 고려한 단계적인 배출가스 규제를 적극 검토중에 있다.

미국, 독일, 일본, 캐나다 등은 정부기관과 연구소를 중심으로 가솔린기관 및 디젤기관의 저공해 LPG 차량으로의 개발에 관한 각종 데이터 축적이 이루어지고 있다. 특히 미국에서는 환경 기준 미달 지역의 저공해 대책으로 LPG 차량의 검토가 진행되고 있으며, 저공해 LPG 자동차의 관련법안을 제정할 움직임이 활발하다.

1930년대부터 미국은 내연기관용 연료로 LPG를 사용하기 시작하여 현재에 이르기까지 LPG 전용 기관의 개발 및 개선을 계속하고 있으며, 국내에서도 1974년 약 1,000대의 영업용 승용차가 LPG를 연료로 사용할 수 있게 법이 개정되었고, 1997년 소형 화물자동차 및 RV형 LPG 승합차가 출시되고, 경제적인 측면에서도 유리한 점 등을 이유로 LPG 자동차의 등록대수는 2000년 3월 현재 42만 5천여대로 최근 급증하고 있는 추세이며, 향후 더욱 확대 보급될 추세이다.

이러한 이유로 현재 차량에 있어서 저공해 연료로 가장 기대를 가지는 연료중의 하나가 LPG이며, LPG 연료의 중요한 특성인 옥탄가는 부탄인 경우 91~97, 프로판인 경우 120정도로써 가솔린에 비해 높기 때문에 과급 및 고압축이 가능하고, 출력 및 열효율을 향상시킬 수 있다²⁾. 또한 LPG 연료는 연소속도가 빠르고 가연한계가 넓기 때문에 희박연소 한계를 넓히면 연료소비율, CO 및 NOx를 저감시킬 수 있다³⁾. 따라서 고출력, 저연비, 저공해 기관을 실현시키기 위해 고압축비, 희박연소에 대한 기관성능, 연소특성, 배기특성 및 압축비 등을 검토하고 LPG 기관의 고압축비, 희박연소 효과를 정립할 필요가 있다.

한편 개선되어야 할 문제점으로는 고부하 영역에서의 5~10% 정도의 출력저하 현상이다. 이것은 LPG 연료의 단위 질량당 발열량은 높지만, 단위 체적당 발열량이 가솔린에 비하여 약 5% 낮고 연료가 가스상태로 공급되어 충전효율이 저하되

기 때문이다⁴⁾. 또한 화염 전파속도가 느리기 때문에 큰 배기량의 기관에는 적용하기 어렵고, 비중이 공기보다 무겁기 때문에 누설시 밀폐된 장소에서 폭발의 위험성이 있으며, 고압 용기를 연료탱크로 사용하기 때문에 차량무게가 증가하는 것이다. 그리고 고회전수 영역에서의 흡입공기가 증가할 수 있도록 흡기계통의 개조가 필요하다.

그러나 고부하 영역에서의 출력저하는 고압축비와 액체상태의 LPG 공급을 통하여 가솔린 기관과 동일한 출력을 얻을 수 있다. 따라서 LPG 연료는 고옥탄가와 고압축비로 출력 및 열효율의 상승을 도모하고, 연소온도를 낮추어 NOx 배출의 저감시키며, 연소속도를 빠르고 하고 가연한계가 넓어 희박연소가 가능하다. 이와 같은 관점에서, 본 연구에서는 LPG 연료를 이용한 고압축화에 따른 고출력, 저연비 LPG 기관을 제작하는데 필요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치의 구성

실험장치는 흡기계통, 실험기관, 배기계통, 기관 동력계, 연소 해석장치 및 배기가스 분석장치로 구성되어 있으며, 그림1에 실험장치의 전체적인 개략도를 나타내었다.

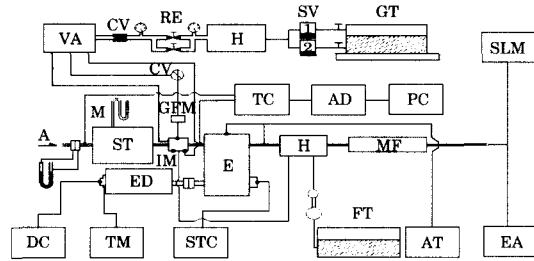
실험에 사용된 기관은 국내에서 생산되는 D사의 불꽃 점화기관으로, 수냉식 4행정 3실린더의 배기량 796cc, 최대출력은 36PS/5000rpm이며, 실험에 사용된 연료는 Gasoline, Propane 97.5% 이상인 가정용 LPG, Butane 성분이 98.7% 이상인 차량용 LPG로 하였으며, 주요 제원은 표2와 같다.

실험기관은 변속기를 거쳐 프로펠러 샤프트를 통해 와전류식 전기 동력계(eddy current type dynamometer)를 직접 연결시켰으며 기관의 회전속도 및 축토크는 동력계 컨트롤러에서 수동으로 제어 계속하였다. 스로틀 개도의 조절은 동력계와 세트르 구성되어 있는 스로틀 액추에이터를 사용하여 보다 정확하게 조절할 수 있도록 하였으며, 배기계통에는 3원 촉매장치없이 배기가스의 맥동을 감소시키기 위해 서지탱크를 설치하였다.

흡·배기관내의 압력 변화를 측정하기 위해 압력계를 설치하였으며, 윤활유와 LPG 연료의 온도를 측정하기 위하여 오일팬의 드레인 플러그 및

베이퍼라이저 출구에 열전대를 설치하여 계측하였다.

가솔린 연료의 경우 기관 위 1.8m 지점에 연료탱크를 설치하여 중력으로 연료를 공급하였으며 연료탱크와 기화기 사이에 유량계(Burette type, 100cc)를 설치하여 연료소비율을 측정하였고, LPG의 연료소비량을 측정하기 위하여 베이퍼라이저와 믹서 사이에 질량식 전용 유량계(Tylan General MFC-290)를 설치하고 가스 유량을 계측하였다. 배기가스 온도는 배기관 출구에서 50mm 위치에 정밀도 0.1°C의 Digital Thermometer를 설치하고 열전대(CA-φ3)를 이용하여 측정하였다. 배기가스중의 오염물질을 측정하기 위해서 본 연구에서는 독일의 rbr-Computer technik



- A : Air
- AF : Air flow meter
- AT : Analogue thermometer
- AD : A/D converter
- CV : Check valve
- DC : Dynamometer controller
- DS : Digital scale
- E : Engine
- ED : Electric dynamometer
- EA : Exhaust gas analyzer
- IM : Intake manifold
- G : Gas tank
- H : Preheater
- FT : Fuel tank
- M : Manmeter
- MF : Muffler
- PC : Personal computer
- RE : Regulator
- ST : Surge tank
- STC : Spark time controller
- SV : Solenoid valve
- TC : Thermocouples
- TM : Tachometer
- VA : Vaporizer

Fig. 1 Schematic diagram of the engine performance test system

Table 1. Specification of dynamometer

Items	Specifications	
Model	Froud Korea (AG-150)	
Type	Eddy-current brake	
Maximum Absorbing power	150kW	
Maximum Absorbing	Standard	8,000rpm
Revolution	High speed	12,000rpm
Maximum Absorbing Torque	500N · m	

Table 2. Engine specification and experimental conditions

Items	Spec & Condition	Remark			
Engine	Type	Water Cooled, 3 Cylinder			
	Bore × Stroke(mm)	68.5 × 72.0			
	Displacement(cc)	796			
	Compression Ratio	9.3 : 1			
Test Condition	Speed(rpm)	1500, 2000, 2500, 3000, 3500			
	Fuel type	Butane, Propane, Gasoline			
	Compression ratio	8.3, 9.3, 9.7			
	Coolant Temperature (°C)	80			
	Ignition Timing (°)	MBT			
	Throttle opening	WOT			
Measurement Item	Exhaust Gas Analysis	Smoke(%)	DBC-1000 (filter paper reflection type)		
		NOx(ppm)	rbr-ecom JN tester		
		HC(ppm)	rbr-ecom JN tester		
		CO(vol %)	rbr-ecom JN tester		
Fuel	Specification	Propane	N-Butane	Iso-Butane	Gasoline
	Octane Number (MON)	96.0	89.6	97.3	87
	Lower calorific value (cal/g)	11,079	10,926	10,892	10,430

GmbH사에서 제작한 rbr-ecom JN측정기를 사용하였다. 이 측정기는 NiCr/Ni thermo element를 장착한 직경 13mm, 길이 250mm의 coaxial probe를 기본장치로 하며, 400°C의 온도 범위까지 측정이 가능하다. 또 이 장치는 O₂, CO, NO 및 NO₂를 동시에 측정할 수 있는데, NO와 NO₂를 total NOx값으로 표시하였다. 본 실험에 사용한 와전류식 전기 동력계의 사양은 표1과 같다.

2. 2 실험방법

실험은 냉각수의 온도 80°C와 윤활유 온도 75°C 범위로 설정하여 난기운전한 후 회전수 변화에 따라 각각 3회씩 반복하였다. 가솔린 연료와 부탄, 프로판 연료 모두에서 MBT(minimum spark advance for best torque)상태로 설정하였고, 기관의 운전은 모두 WOT(wide open throttle)상태로 하였으며, 공기과잉률 1.0의 상태에서 기관의 회전수를 1500rpm에서 3500rpm까지 500rpm 간격으로 변화를 주었다.

LPG 연료의 연료 소비량을 측정하기 위해서 습식 가스 측정기(wet gas meter)를 사용하였고, 기관은 LPG 연료의 옥탄가 및 한계 압축비에 맞도록 실린더 헤드면을 기준면으로부터 0.5mm 절삭 가공 후에 헤드 가스켓을 겹쳐서 연소실의 체적변화로 압축비를 변화시켰다. 표3은 제작된 기관의 압축비를 나타낸 것이다.

Table 3. Modification of the engine.

Items	Original engine	Modified engine(A)	Modified engine(B)
Displacement (cc)	265.34	265.34	265.34
Combustion chamber volume (cc)	31.96	36.38	30.46
Compression ratio	9.3	8.3	9.7

3. 실험결과 및 고찰

LPG 기관에서 이용하는 부탄과 가정용 프로판을 연료로 사용하여 압축비 및 기관의 회전속도 변화에 따른 출력, 토크, 연료소비율, 배기가스의 온도 및 배기 배출물 등을 측정하였으며 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

3. 1 기관 출력

그림 2는 MBT, WOT, λ=1.0인 상태에서 사용 연료 및 압축비 변화에 따른 축 출력을 나타내었고, 그림 3은 기관 회전수와 토크를 나타내고 있다. 그림2에서 알 수 있는 바와 같이 축 출력은 연료의 종류에 관계없이 압축비가 높을수록 증가하였으며, 압축비 8.3의 경우에 기관에 비하여 9.7로 고압축하였을 때 기관의 회전속도에 따라 약 5~10% 출력이 증가되었다. 상용회전수인 3000rpm에서의 출력을 살펴보면, 가솔린은 25.02ps을 나타내었고, 부탄은 압축비 8.3에서 23.4ps, 9.3에서 24.1ps, 9.7에서 24.26ps을 나타내었다. 동일 압축

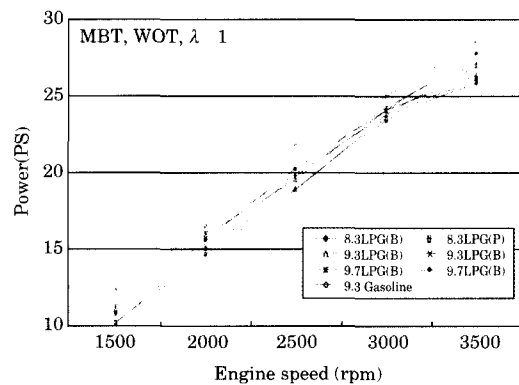


Fig. 2 Comparison of power on the fuel of LPG and gasoline vs. engine speed at various compression ratios.

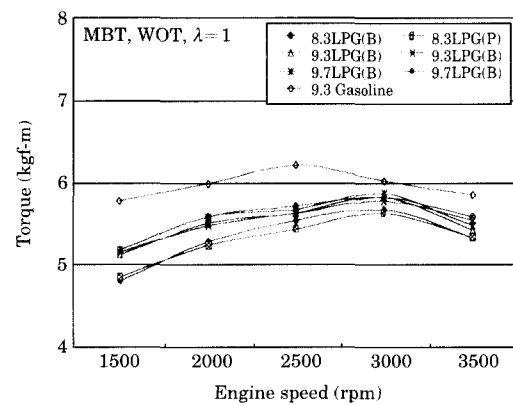


Fig. 3 Comparison of torque on the fuel of LPG and gasoline vs. engine speed at various compression ratios.

비에서 출력은 부탄의 경우 가솔린에 비하여 평균 7% 정도 감소하였으나 3000rpm에서는 약 3.7% 감소하였다.

토크는 그림3에서와 같이 가솔린 2500rpm, LPG 3000rpm에서 최대 토크를 나타내었으며 그 이상에서는 급격히 토크가 감소되는 경향을 나타내었다. 3000rpm에서 가솔린은 6.02kgf-m, 부탄은 압축비 8.3에서 5.68kgf-m, 9.3에서 5.83kgf-m, 9.7에서 5.88kgf-m를 나타내었다. 부탄은 가솔린에 비하여 동일 압축비에서 토크가 평균 약 8% 감소되었으나, 3000rpm에서는 약 3.2% 감소되었다.

LPG 연료의 출력 및 토크가 가솔린에 비하여 작아지는 것은 LPG가 가솔린에 비해 연료의 단위 체적당 발열량이 낮기 때문인 것으로 보인다. 한편, 동일 압축비에서 부탄과 프로판은 거의 유사한 출력과 토크를 나타내었다.

3. 2 제동 연료소비율

그림 4는 기관의 회전속도변화에 따른 연료소비율과의 관계를 연료와 압축비를 매개 변수로 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구의 전 회전수 범위 내에서 LPG의 연료 소비율은 기관의 회전속도 증가에 따라 감소하는 추세를 보였으며, 가솔린에 비하여 저속에서는 작게 나타났다. 그러나 가솔린이 최대 토크를 얻은 2500 rpm을 기점으로 가솔린의 연료소비율이 LPG에 비하여 급격히 감소되었다.

고속에서 가솔린의 연료소비율이 급감하는 이유

는 가솔린의 단위 중량당 발열량이 LPG에 비하여 높고 액체 상태로 공급되기 때문에 체적효율이 LPG에 비해 높아지기 때문인 것으로 사료된다. 3000rpm에서 연료소비율은 가솔린이 216g/ps-h를 나타내었으며, 부탄은 압축비 8.3에서 233g/ps-h, 9.3에서 226g/ps-h, 9.7에서 217g/ps-h를 나타내었다. 이와 같이 고압축비로 갈수록 연료소비율이 감소하였다.

LPG 연료의 경우, 연료소비율은 압축비 8.3에 비하여 9.7인 경우 평균 약 5%정도 감소하였는데 이는 압축비 증가에 따른 열효율의 향상으로 인하여 나타나는 것이라고 사료된다. 따라서 연료의 경제성 면에서는 가솔린은 3000rpm, LPG는 3500rpm부근에서 운전하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3. 3 제동 열효율

그림 5는 기관의 회전속도 및 압축비 변화에 따른 제동열효율을 나타내었는데, 가솔린 기관의 제동열효율이 전반적으로 높으며, 연료소비율이 가장 낮은 3000rpm에서 28.07%를 나타내었다. 부탄은 압축비 8.3에서 24.9%, 9.3에서 25.68%, 9.7에서 26.26%를 나타내었다. 이와 같이 부탄은 가솔린에 비하여 동일 압축비에서 열효율이 8.5% 감소하였으며, 전 회전수 영역에서 평균 약 4.5% 감소하였다.

LPG 연료의 경우 열효율이 낮은 이유는 가솔린

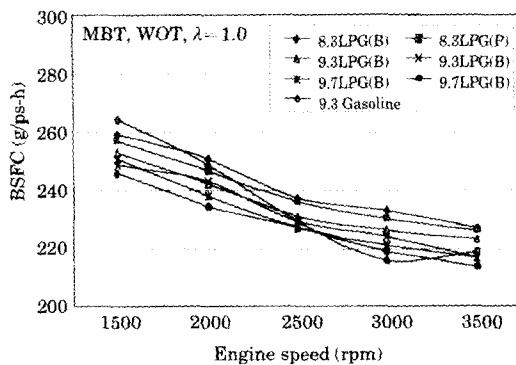


Fig. 4 Comparison of BSFC on the fuel of LPG and gasoline vs. engine speed at various compression ratios.

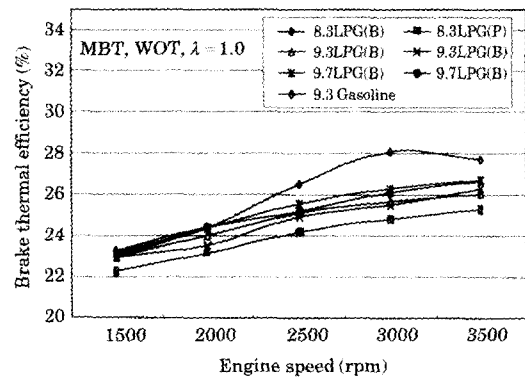


Fig. 5 Comparison of brake thermal efficiency on the fuel of LPG and gasoline vs. engine speed at various compression ratios.

연료에 비하여 발열량이 높지만 비중이 낮으므로 출력이 감소하는 결과를 초래하여 열효율이 낮은 것으로 사료된다. 그리고 압축비 증가에 따라 열효율은 향상되었으며 부탄이 프로판에 비하여 다소 높게 나타나는 경향을 보였다. LPG연료의 성능 특성이 고속에서는 가솔린에 비하여 열효율이 낮았으나 저속에서는 가솔린과 큰 차이가 없었다.

3. 4 배기가스 분석

3.4.1 HC 농도

그림 6은 기관의 회전속도 및 압축비 변화에 따른 탄화수소의 배출농도를 표시한 것이다.

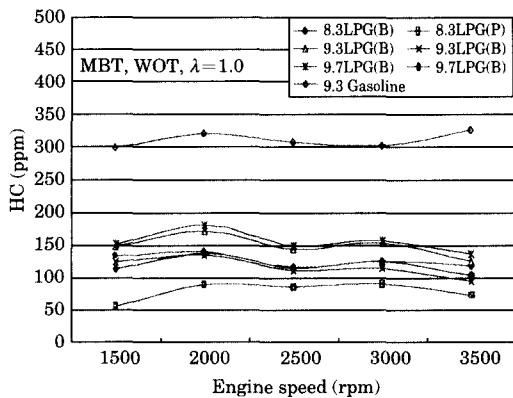


Fig. 6 Comparison of hydrocarbon on the fuel of LPG and gasoline vs. engine speed at various compression ratios.

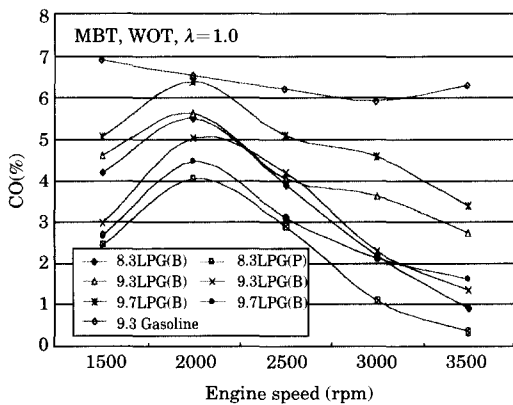


Fig. 7 Comparison of CO on the fuel of LPG and gasoline vs. engine speed at various compression ratios.

3000rpm에서 가솔린은 303ppm, 부탄은 압축비 8.3에서 125ppm, 9.3에서 153ppm, 9.7에서 156ppm을 나타내었다. 동일 압축비에서는 가솔린에 비하여 49.5% 감소하였으며, 평균 약 53% 감소하였다. 기관의 회전속도 변화에 따른 탄화수소 배출농도는 대체로 큰 변동은 없었으며, 프로판의 경우 압축비 8.3에서 최대값은 92ppm, 9.3에서 137ppm, 9.7에서 139ppm을 나타내었다. 압축비가 증가할수록 탄화수소 배출농도는 상승하는 경향이였다. 한편, 프로판은 부탄에 비하여 탄화수소의 배출량이 평균 20~30%정도 낮은 것으로 나타났으나 고압축비에서의 차이는 줄어드는 경향을 보였다.

3.4.2 CO 농도

그림 7은 기관의 회전속도 및 압축비 변화에 따른 일산화탄소의 배출농도를 표시한 것이다. 가솔린의 경우 CO의 배출농도는 회전수에 따라 5.9~6.9%의 범위를 나타내었고, 3000rpm에서 최소값을 보였다. 3000rpm에 대한 부탄의 CO 농도는 압축비 8.3에서 2.19%, 9.3에서 3.63%, 9.7에서 4.57%로 가솔린에 비해 38.5% 감소 하였으며, 평균 35.2% 감소하였다.

이것은 LPG 연료가 가솔린에 비해 연소속도가 느리고 연료 자체의 탄소성분이 적기 때문인 것으로 판단된다. LPG 연료는 저속 회전수 영역에서는 CO의 배출농도가 증가하는 경향이 고, 2000rpm을 최대로 고속 회전수 영역으로 갈수록 CO의 배출량이 감소하였다. 압축비가 증가함에 따라 일산화탄소의 발생량이 증가하였다. 한편, 부탄은 프로판에 비하여 일산화탄소의 발생량이 약 52%정도 증가하였다.

3.4.3 배기가스 온도

그림 8에 기관의 회전속도 및 압축비 변화에 따른 배기가스의 온도 변화를 나타내었다. 가솔린의 경우 배기가스의 온도는 3000rpm에서 590°C로 나타났다. 부탄의 경우 압축비 8.3에서 625°C, 압축비 9.3에서 611°C, 압축비 9.7에서 603°C를 나타내었다. 이와 같이 배기가스 온도는 부탄이 가솔린에 비하여 약 3.6% 증가하였으며, 본 연구의 전 회전수 범위 내에서 평균 약 4.2% 높게 나타났다.

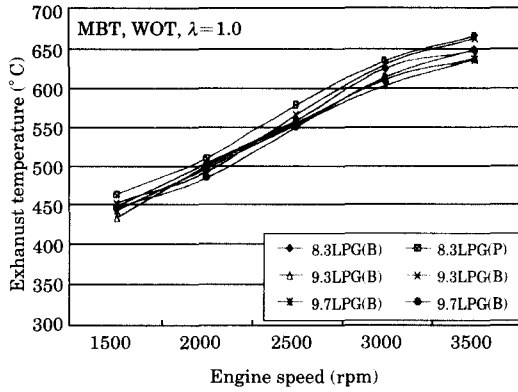


Fig. 8 Relationship between exhaust temperature on the fuel of LPG and gasoline and engine speed at various compression ratios.

이것은 LPG의 발열량이 가솔린에 비해 높고 연소최고압력이 낮아지기 때문인 것으로 보여진다. 동일한 LPG 연료의 경우 압축비가 높아질수록 배기가스의 온도는 약간 감소하였는데 이것은 연소실내의 압력 상승률과 최고 압력이 높았기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

기관의 성능 개선을 목적으로 부탄과 프로판을 주 연료로 사용하여 기관의 회전수 및 압축비 변화에 따라 기관의 출력, 토크, 연료소비율, 배기가스 온도 및 배기 배출물의 농도를 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1. LPG 연료는 가솔린에 비하여 같은 압축비에서 출력 및 토크는 약 8% 감소 하였다. LPG 연료는 압축비의 증가에 따라 출력이 증가하였으며, 프로판과 부탄의 출력 차이는 미소하였다.
2. 가솔린 연료의 경우 3000rpm에서의 연료소비율이 압축비 변화에 따른 LPG 연료의 연료소비율보다 낮았다. 압축비가 동일한 경우 부탄은 가솔린에 비해 저속에서는 연료소비율이 낮게 나타났지만, 고속에서는 가솔린보다 높게 나타났다.
3. 제동 열효율은 부탄의 경우 가솔린에 비하여

1,500rpm에서는 차이가 미소 하였으나, 3000rpm에서는 약 8.5% 감소하였으며, 전회전수 영역에서 평균 4.5% 낮게 나타났다. LPG 연료는 압축비가 증가함에 따라 제동 열효율이 증가하였으며, 부탄이 프로판에 비해 다소 높게 나타났다.

4. LPG 연료의 배기 배출물은 HC의 경우 압축비가 상승할수록 증가하였고, 가솔린 연료에 비하여 부탄의 경우 53% 낮게 나타났다. CO의 경우에서도 가솔린 연료가 가장 높게 나타났으며, 프로판 연료가 부탄연료보다 모든 압축비에서 배출량이 적었다. 부탄은 가솔린에 비하여 CO 배출량이 35% 낮게 나타났으며, CO 및 HC에 있어서는 부탄의 경우 프로판에 비해 27%와 52% 높게 나타났다.
5. 배기가스 온도는 압축비가 증가할수록 감소하였으며, 부탄이 프로판에 비하여 3% 낮게 나타났다.

참고문헌

1. 조기현 외, "농용 석유기관의 LPG이용에 관한 연구," 한국농업기계학회지 제22권 제2호, pp. 189~198,(1997)
2. 조기현 외, "LP가스 차량용 기관의 성능특성에 관한 실험적 연구," 한국박용기관학회지 제23권 제5호, pp. 46~53.(1999)
3. Arcoumanis, C., Bicen, A. F., and Whitelaw, J. H., "Effect of Inlet Parameters on the Flow Characteristics in a Four-Stroke Model Engine", SAE 820750, (1982)
4. Bass E. Bailey, "LPG Conversion and HC Emissions Speciation of a Light-Duty Vehicle," SAE Paper No. 932745, (1993)
5. Hill, P. G., et al, "The Performance of a Spark-Ignition Fuelled with LPG," SAE Paper No. 840234,(1984)
6. Larson, G. H., "LP Gas as a Fuel for Farm Power Units. Agri. Engng, "Vol. 31, Part 5, pp.215~218, (1950)
7. Latuser, J. P, and R. W. Burrahm, "Conversion of Two Small Utility Engines to LPG Fuel," SAE Paper No. 932447, (1993)

8. Matthews, R., et al, "The Texas Project Part 1 – Emissions and Fuel Economy of Aftermarket CNG and LPG Conversions of Light-Duty Vehicles," SAE Paper No. 962098. (1996)

저 자 소 개



백태실(白泰實)

1960년 10월생. 1983년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1989년 2월 동대학원 졸업(공학석사). 2001년 2월 한국해양대학교 기계공학과 박사(공학박사) 수료. 현~포항 1대학 자동차과 전임강사.



조기현(趙基顯)

1969년 1월생. 1991년 대동공업(주). 1992년 대우자동차(주). 1994년 경상대학교 (공학석사). 2000년 경상대학교 (공학박사). 현~경북도립 경도대학 차량기계학과. 조교수(학과장).



정형길(鄭炯信)

1970년 11월생. 2000년 경상대학교 졸업. (공학석사). 현~경상대학교 대학원 박사과정.