

LPG연료 엔진의 피스톤온도 및 카본디포짓 형성에 관한 연구

A Study on the Piston Temperatures and Carbon Deposit Formation in LPG Fuelled Engine

민 병 순*, 최 재 권*, 박 찬 준**
B. S. Min, J. K. Choi, C. J. Park

ABSTRACT

The wide open throttle performance and piston temperatures were measured by the change of fuel : gasoline and liquefied petroleum gas(LPG). Bench test method was developed and experimented to study the effect of temperature on the formation of carbon deposit. The bench test results were confirmed by measuring the piston temperature and observing the deposit production rate at an actual engine running condition. Results show that if the fuel of spark ignition engine is changed from gasoline to LPG, the output power decreases about 10% and the piston temperatures increase about 40~55°C. In actual engine tests, because of this temperature increase, it was observed that the quantity of carbon deposit in the top ring groove increased in a big degree. Consequently, it is known that the ring sticking may occur if the gasoline engine was rebuilt to LPG fuelled engine. Therefore, in order to preserve the durability of LPG fuelled engine, it is necessary to lower the piston temperature by hardware modification or to reduce the carbon deposit by the improvement of engine oil.

주요기술용어 : LPG(액화석유가스), Piston temperature(피스톤온도), Carbon deposit(카본 디포짓), Ring sticking(링 고착), Linkage system(링크기구)

* 정회원, 현대자동차 중앙연구소

** 정회원, 서울산업대학교 기계공학과

1. 서 론

액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, 이하 LPG)는 석유의 정제과정에서 나오는 부산물로서 그 에너지 가격이 저렴하기 때문에 스파크 점화(Spark ignition)엔진의 연료로써 사용하고 있는데 우리나라에서는 주로 영업용 승용차에 공급되고 있다. LPG 연료 엔진은 그 경제성으로 인하여 각광을 받고 있지만 가솔린 엔진과 하드웨어의 공용성 때문에 실용화시 연소속도, 착화온도 등 서로 다른 연료의 특성에 의해 문제점이 발생할 가능성이 있어 연료에 따른 성능의 변화는 명확히 할 필요가 있다. LPG연료 엔진의 문제점에 대하여는 増田¹⁾ 등이 연료 및 연소상의 상이점에 대하여 논의한 바 있어 LPG연료 사용시 연소실 주위 부품의 온도상승에 관하여 경고한 바 있다. 이후에는 LPG연료의 디젤 엔진에서의 사용에 관한 연구^{1),2),3)}가 있다. 온도상승이 우려되는 부품들 중 피스톤의 경우, 온도가 상승하면 재질의 강도와 내마모성 저하와 함께 카본디포짓(Carbon deposit)이 증가하는 문제점이 발생할 수 있다. 카본디포짓은 링고착을 야기할 가능성이 있는데 Roehrl⁵⁾은 이를 방지하기 위하여 피스톤 링그루브(ring groove)의 최고온도를 220~240℃ 이하로 유지해야 한다고 하였다. McGeehan⁶⁾은 디젤엔진에서의 실험을 통해 고스모크 조건 하에서 수트(soot)가 피스톤 디포짓 형성에 주요인자임을 규명하고 피스톤온도 증가에 따른 디포짓 형성량을 정량화 하였다.

본 연구에서는 가솔린연료 엔진을 LPG연료 엔진으로 개조했을 때 엔진의 주요 성능변화와 함께 피스톤온도의 변화를 측정하였다. 온도변화에 따른 디포짓 형성의 특성을 파악할 수 있는 벤치시험장치를 제작하고 실험하여 피스톤 링그루브 내의 온도조건이 카본디포짓 문제를 야기할 수 있는지를 판정할 수 있도록 하였다. 마지막으로 실제 엔진을 고온조건으로 운전시킴으로써 벤치시험의 판정결과를 확인하였다.

2. 실 험

2.1 실험엔진 및 연료의 성상

수냉식 4기통 스파크점화엔진을 실험하였다. 실험엔진의 주요 사양을 다음 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Typical specification of test engine

Displacement	2351cc
Bore×Stroke	86.5mm×100mm
Compression ratio	8.6
Valve train	SOHC

실험에 사용한 LPG와 가솔린의 주요 성상을 Table 2에 나타내었다. 프로판과 부탄이 LPG의 주요 구성원소인데 우리나라에서 공급되는 LPG는 대부분 부탄으로 이루어져 있고 그중 30% 정도는 i-부탄, 나머지는 n-부탄이다. Table 2를 보면 LPG는 가솔린에 비하여 기화열, 발열량, 착화온도, 옥탄가 등이 높다는 특징을 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Typical specification of test fuels

		LPG			가솔린
		프로판	n-부탄	i-부탄	
비중	액체	0.508	0.584	0.563	0.75
	기체	1.547	2.071	2.007	
기화열 (kcal/kg)		101.8	92.1	87.6	72.6
착화온도 (℃)		481	441	544	210~300
저위발열량 (kcal/kg)		11070	10920	10890	10500
이론공연비		15.7	15.5	15.5	14.6
옥탄가		125	91	99	91

2.2 피스톤온도 측정

크라운과 톱링그루브를 중심으로 8군데의 온도를 측정하였다. 각 측정점을 다음 Fig.1에 나타내었고 그에 대한 설명은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Thermocouple location

	부 위	위 치
1	Crown	Rear
2		Exhaust
3		Spark plug
4		Front
5	Top ring groove	Rear
6		Exhaust
7		Front
8		Intake

K-type 열전대를 Fig.1의 단면도에 나타낸 바와 같이 설치하여 정상상태온도(Steady state temperature)를 측정하였다. 피스톤으로부터 외부의 장비까지 신호선의 인출을 위하여 가위형 링크기구(Scissor type linkage system)를 사용하였다.

2.3 디포짓 형성 벤치시험

온도가 카본디포짓에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험장치를 Fig.2에 나타내었다.

본 장비는 오일의 카본디포짓 형성특성을 연구하기 위한 패널코킹시험법(panel coking test method)⁷⁾을 개선하여 온도의 효과를 좀 더 명확히 보고자 당 연구소에 수정한 것이다. 오일누설장치를 거쳐 일정한 온도로 유지되고 일정 기

울기를 갖고 있는 시편 위로 공급된 오일이 흐르면서 그 위에 디포짓이 형성되도록 하였다. 챔버 내의 온도는 200℃로 유지하였고 오일누설량은 1g/hr로 일정하게 조절하였다. 일정시간 전후의 무게 차이를 측정하여 디포짓 형성량을 구하였다.

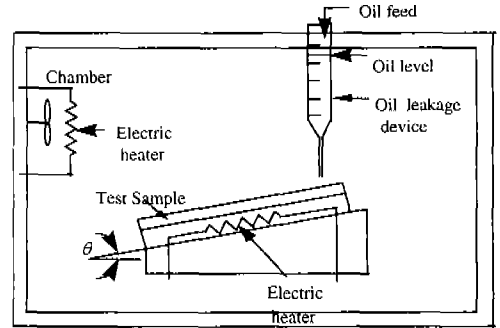


Fig.2 Schematic of bench test apparatus

3. 결과 및 검토

3.1 연료에 따른 성능 및 온도차이

Fig.3에 연료에 따른 출력의 차이를 나타내었다. 가솔린을 연료로 사용하는 엔진을 연료계만 변경하여 LPG연료로 시험한 결과 출력은 저하되고 그 차이는 엔진회전수의 증가에 따라 벌어졌다. 그 결과 최고출력이 약 10% 정도 감소하게 된다. 그 원인으로서는 먼저 LPG는 연료가 가스상태로 유출되어 연소실 내에서 부피를 차지

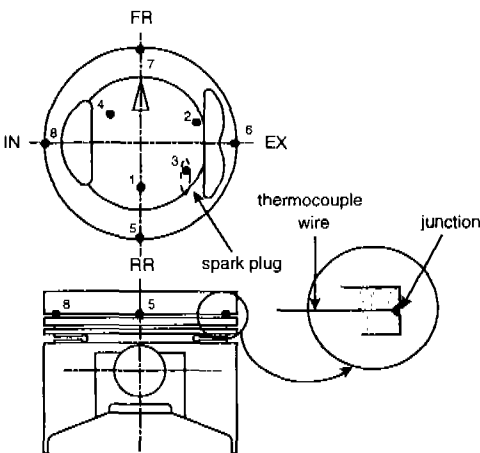


Fig.1 Location of thermocouple junction

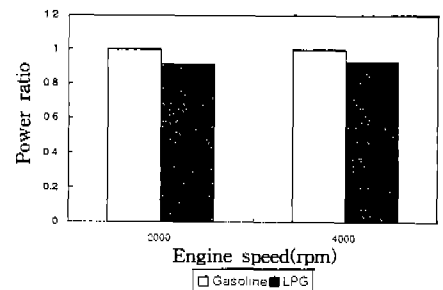


Fig.3 Maximum powers with the two different fuels: gasolin & LPG (Load:WOT, Spark timing:MBT)

하므로 액체상태로 흡입된 가솔린과 달리 흡입 공기량이 작아지며 믹서의 벤츄리 직경이 작은 것도 흡입 공기량을 줄인다는 데서 찾을 수 있다. 또 LPG의 완전연소를 위한 이론 공연비가 가솔린 보다 희박하여 단위 무게 당 발열량은 가솔린 보다 크지만 동일 공기량에 대한 발열량은 가솔린에 비하여 오히려 작아진다는 것도 원인으로 작용한다.

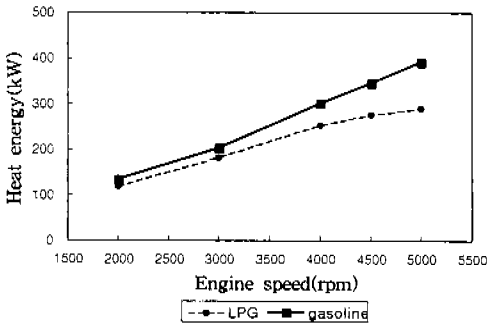
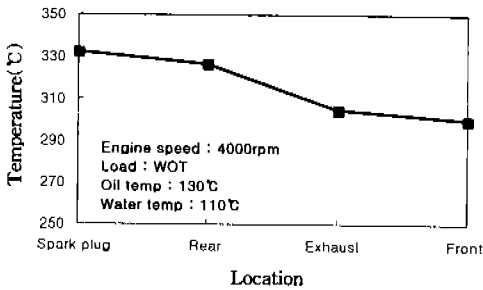
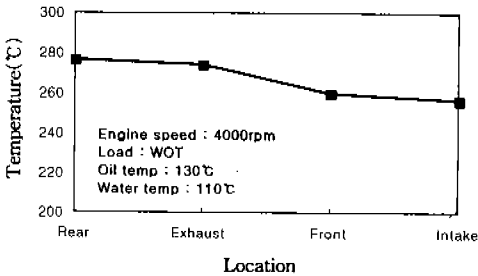


Fig.4 Heat energies with the two different fuels: gasoline & LPG



(a) Crown



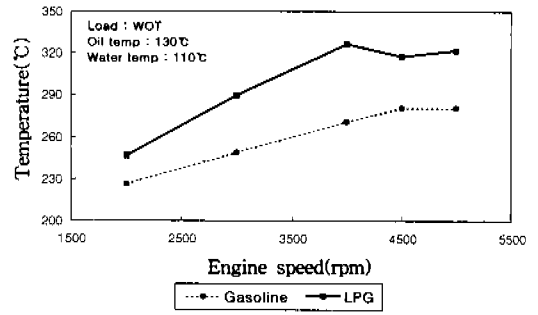
(b) Top ring groove

Fig.5 Temperature distributions in piston

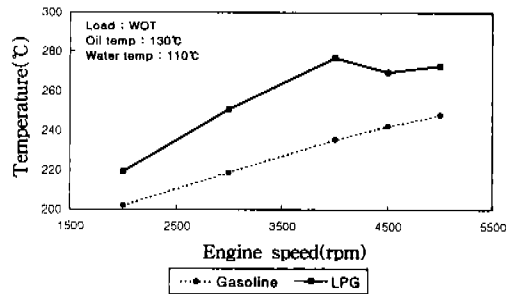
Fig.4에 투입연료의 총 열에너지를 나타내었다. 전술한 바와 같은 원인에 의하여 연소실로 유입되는 총열량은 가솔린보다 작게 되고 그에 따라 출력이 감소하게 된다.

LPG를 연료로 사용한 피스톤의 원주방향에 따른 온도분포를 Fig.5에 나타내었다. 크라운은 스파크플러그 아래가 가장 온도가 높고 스파크플러그에서 멀어질수록 온도가 낮게 된다. 톱링 그루브도 크라운과 유사한 온도분포를 보여 스파크플러그와 가까운 후방(rear side)의 온도가 가장 높게 된다. 스파크플러그 부근은 화염과 접해 있는 기간이 상대적으로 길기 때문에 많은 열량이 전달되므로 온도가 높게 형성된다.

Fig.6에는 연료에 따른 온도의 차이를 나타내었다. 사용된 링크기구는 두가지 연료에서의 실험을 마칠 때까지 내구성에 문제를 일으키지



(a) Crown(rear side)



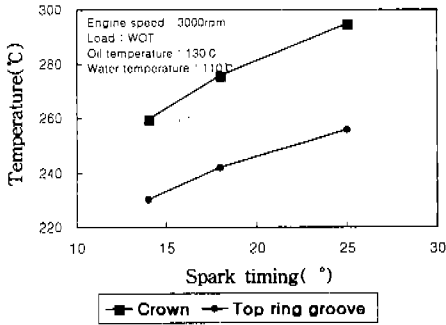
(b) Top ring groove(rear side)

Fig.6 Temperature variations according to the fuels : LPG and Gasoline

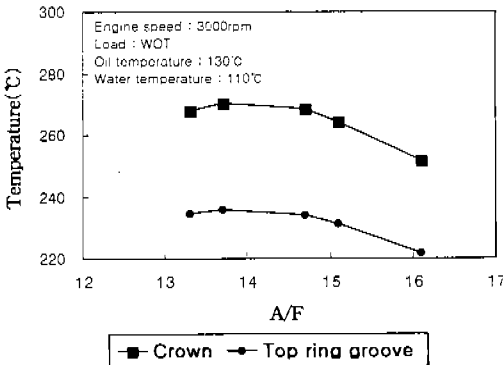
는 않았다. LPG연료를 사용한 경우에 온도가 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. 동일한 엔진회전수(4000rpm)를 기준으로 하면 크라운의 경우에는 55℃, 톱링그루브의 경우에는 40℃ 정도 높게 측정되었다. 투입된 연료의 발열량은 가솔린 엔진이 높지만 피스톤의 온도가 반대의 경향을 나타내는 것은 기체로 유입되었기 때문에 기화열이 없는 것과 연소속도의 차이 등 연소특성이 연료에 따라 서로 다르기 때문인 것을 생각된다.

3.2 운전변수의 영향

LPG연료를 사용한 엔진의 운전변수에 따른 피스톤 온도의 변화를 점화시기와 공연비에 대하여 Fig.7에 나타내었다. 점화시기를 1° 진각시킴에 따라 크라운은 3~4℃ 증가하고 톱링그루



(a) Effect of spark timing



(b) Effect of A/F ratio

Fig.7 Effect of operating variables on the piston temperature of LPG engine

브는 2~3.5℃ 증가하였다. 공연비에 대한 온도 변화는 Fig.7(b)에 나타내었는데 14 : 1 정도에서 최고 온도가 나타남을 알 수 있다. 가솔린을 연료로 한 엔진의 경우에는 공연비가 13 : 1인 경우에 최고 온도를 나타내어 공연비의 절대값에서는 차이가 나지만 두 연료의 이론공연비가 틀리기 때문에 공기과잉률의 관점에서 보면 두 연료 모두 0.9 정도로써 유사하였다. 최고온도에서 공연비를 1 증가시킴에 따라서는 크라운은 12℃, 톱링그루브는 9℃ 정도씩 감소하였다.

3.3 온도에 따른 디포짓 형성량

앞장에서 하드웨어의 변경 없이 연료계 만 수정하여 LPG 연료를 사용할 수 있도록 개조하면 피스톤의 온도가 크게 상승함을 보였다. 이러한 온도상승은 재질의 강도저하, 오일의 산화로 인한 카본디포짓의 형성 등으로 엔진의 내구성에 심각한 피해를 초래하는데 본 연구에서는 그 중 카본디포짓의 형성에 대하여 연구하였다. Fig.8은 벤치시험장비를 이용하여 측정한 온도에 대한 디포짓 형성량을 나타낸 것이다. 시편의 온도가 220℃인 경우에는 디포짓이 거의 생성되지 않는다. 낮은 온도에서는 흐르는 오일 중 미량의 성분이 산화되어 디포짓을 형성하기도 하지만 대부분이 증발되거나 흘러내리기 때문에 디포짓의 형성량은 매우 적다. 온도를 증가시키면 260℃까지는 디포짓 형성량이 서서히 증가하지만 260℃

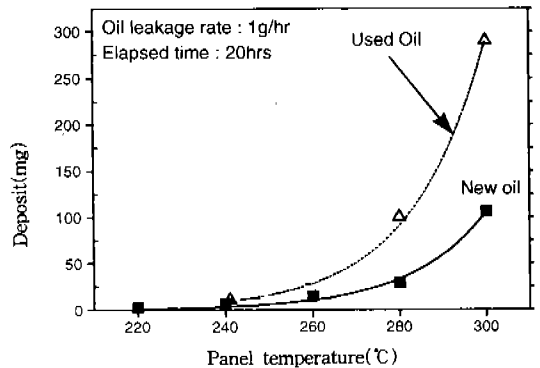
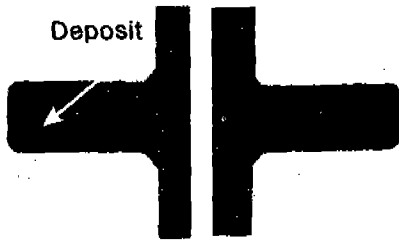
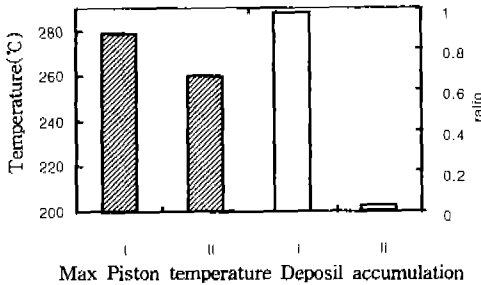


Fig.8 Effect of panel temperature on deposit formation



Piston I Piston II
 (a) Formed deposit in top ring groove



(b) Temperature and deposit formation

Fig.9 Effect of temperature on the deposit formation in engine test

를 넘으면 그 형성량이 급증하게 된다. 온도가 상승하면 고온에서 첨가제가 열분해되고 오일의 산화를 촉진하기 때문에 카본 디포짓의 형성량이 증가하는데 그 경계점이 260°C 정도라는 것을 알 수 있다. 더우기 어느 정도 산화가 진행된 사용유의 경우는 신유보다 형성량이 크게 증가하여 실 엔진에서도 디포짓에 의한 링고착의 문제가 우려되는 수준임을 알 수 있다.

4.4 실엔진에서의 디포짓 형성량

벤치시험을 통해 확인된 온도에 따른 디포짓 형성량을 실제 엔진에서 일정기간 운전한 피스톤의 링그루브 내에 퇴적된 디포짓의 양을 관찰함으로써 비교하였다. 실 엔진시험은 LPG를 사용한 동일엔진에서 온도만 변경시켜서 수행하였다. 온도조건은 기 측정된 온도결과를 바탕으로 추정하였다. Fig.9에 링그루브 내의 카본디포짓 형성모습과 온도를 비교해 놓았다. 각 피스톤의

Table 4 Test conditions

Piston	Engine speed	Elapsed time
I	4,000~5,000rpm	50hrs
II	4,000~5,000rpm	100hrs

운전조건은 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 피스톤 I은 LPG 연료엔진의 원래 사양으로써 온도가 높은 것이고 피스톤 II는 마찬가지로 LPG 엔진으로 온도가 높아야 하지만 점화시기를 지연시킴으로써 인위적으로 피스톤온도를 낮춘 것이다. Fig.9(b)의 좌측에는 운전조건 중 최고 피스톤온도를 비교해 놓았고 우측에는 디포짓의 퇴적량을 정량화한 것으로 디포짓의 두께를 배면틈새로 나눈 값을 의미한다. 즉 이 값이 0이면 디포짓이 하나도 없다는 것이고 1이면 링의 뒷면을 가득 채워 링이 움직이지 않는 정도, 즉 링스틱(ring stick)상태를 의미한다.

두 피스톤의 온도조건은 약 20°C 정도 차이가 나는데 이 차이에 의해 피스톤 I은 링그루브에 퇴적된 디포짓이 링과 그루브 사이의 틈새를 거의 채웠고 피스톤 II는 오래 운전했음에도 불구하고 디포짓 형성이 크게 감소하였음을 알 수 있다. 즉 내구성에 전혀 문제가 없었던 가솔린엔진을 연료계만 LPG용으로 교체하면 피스톤 온도가 상승하여 카본디포짓에 의한 링의 고착을 유발할 가능성이 증가한다. 이는 엔진의 내구성을 치명적으로 손상시키기 때문에 LPG 연료를 사용하는 엔진의 개발을 위하여는 피스톤온도를 저감시키거나 오일의 개선을 통해 고온에서 디포짓의 생성을 억제시키는 등의 노력이 필요하다.

4. 결 론

- 1) 가솔린연료 사용엔진을 LPG용으로 개조하면 기체상태의 연료유입으로 인한 공기 유입량 감소에 기화기에서 벤츨리통과에 의한 공기흡입량 감소의 효과가 더해져 출력이 약 10%정도 감소한다.
- 2) 연료변경에 의해 LPG사용 엔진의 피스톤은

참 고 사 항

- 가솔린 사용엔진에 비해 크라운은 55℃, 톱링그루브는 40℃ 정도 온도가 증가한다.
- 3) 벤치시험을 통해 온도에 대한 디포짓 형성 특성을 실험한 결과 시편의 온도가 260℃를 넘으면서 디포짓 형성량이 급증하며 사용유의 경우 그 증가폭이 신유에 비해 훨씬 커 링고착이 우려되는 수준에 까지 도달하게 된다. 따라서 사용유를 고려하여야 하는 실제 엔진에서 카본디포짓에 의한 링고착을 방지하기 위하여는 피스톤 링그루브의 온도를 260℃ 이하로 유지시켜야 한다.
 - 4) 실 엔진에서의 운전을 통해 피스톤 톱링그루브의 온도가 260℃를 넘는 경우에 디포짓 형성량이 크게 증가한다는 것을 확인하였다.
 - 5) 연료계를 교체함으로써 가솔린연료 엔진을 LPG연료 엔진으로 개조하는 경우에 카본디포짓에 의한 링고착 문제가 발생할 가능성이 크게 증가하며 이를 방지하기 위하여는 하드웨어의 변경으로 피스톤온도를 낮추거나 오일의 개선으로 고온조건에서 카본퇴적을 줄이는 것 등으로 내구성을 확보해 주어야 한다.
1. 増田哲三 외, ガソリン機關のLPG 運轉による 問題點, 内燃機關, Vol.8, No.85, 1969.
 2. S.Goto et al, "LPG Diesel Engine", JSAE Review, Vol.14, No.1, 1993.
 3. 後藤新一 外,LPG デイゼルエンジン, 自動車技術會學術講演會, 921058.
 4. Juke van der Weide et al, Experiences with CNG and LPG Operated Heavy Duty Vehicles with Emphasis on US HD Diesel Emission Standards, SAE 881657.
 5. Manfred D. Roehrlie, Thermal Effects on Diesel Engine Piston, SAE 780781.
 6. J.A.McGeehan, et al, The Effects of Piston Temperature and Fuel Sulfur on Diesel Engine Piston Deposits, SAE 821216.
 7. J.Mitsui, K.Akiyama, F.Ueda, M.Okada, H.Ohira, "Effect of Gasoline Engine Oil Components on Intake Valve Deposit", SAE932792.