

LPG엔진에서 수소첨가가 배기 성능과 열효율에 미치는 영향 (II)

권태윤*, 김진호*, 최경호**, 정연종***

*계명대학교 대학원, **계명대학교 자동차공학과,

***대구미래대학 자동차과

Effects of Hydrogen-enriched LPG Fuelled Engine on Exhaust Emission and Thermal Efficiency (II)

T. Y. Kwon*, J. H. Kim*, G. H. Choi*, Y. J. Chung**

*Grad. School of Keimyung Univ.,

**Department of Automotive engineering, Keimyung Univ.,

1000 Shindangdong Dalsugu Daegu, 704-701, South Korea

**Department of Automotive engineering, Daegu Mirae College,

270 Pyeongshan-dong Gyeongsan-si Gyeongsangbuk-do, 712-716, South Korea

ABSTRACT

The purpose of study is obtaining low-emission and high-efficiency in LPi engine with hydrogen enrichment. The test engine was named variable compression ratio single cylinder engine (VACRE). The fuel supply system provides LPG/hydrogen mixtures based on same heating value. A varied sensors such as crank shaft position sensor (CPS) and hall sensor supplies spark timing data to ignition controller. Displacement of VACRE is 1858.2cm³. VACRE was runned 1400rpm with compression ratio 8. Spark timing was set MBT without knocking. Relative air-fuel ratio(λ) of this work was varied between 0.8 and 1.5.

주요기술용어 : VACRE(Variable Compression Ratio Single-cylinder Engine: 가변압축단기통엔진), LPi(Liquid Propane injection: LPG 액상 분사), λ (Equivalence air-fuel ratio: 공기 연료 당량비), Hydrogen enrichment rate(수소첨가율)

1. 서 론

현재 자동차에 의한 대기 오염이 날로 증가하고, 더욱 강화된 배기가스규제로 인해 청정 및 대체에너지 개발에 대한 사회적 국가적 요구가

증대되고 있다. 이러한 가운데 LPG 자동차는 유럽을 중심으로 환경 친화적인 저공해 자동차로 전세계적으로 가장 널리 보급되어지고 있다¹⁾.

국내에서도 최근에는 국내에서도 LPG자동차 기술을 선진수준으로 향상시키고자 하는 연구가

활발히 진행되고 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 LPG 기관은 대부분 베이퍼라이저(Vaporizer)에서 기화된 연료와 공기를 일정 비율로 혼합해 공급하는 믹서타입(Mixer type) 엔진이다.

LPG자동차에서 기관 운전성 및 연료소비율을 향상시키고 유해배출가스의 저감 등을 도모하기 위하여 새롭게 개발된 것이 LPI(Liquid Propane Injection) 시스템이다. LPI 연료공급시스템은 기존의 Mixer 시스템과 달리 LPG 연료를 액체 연료의 상태로 흡기관에 분사하는 방식이다.

LPG 액체연료 흡기관 분사방식(LPI)는 기화열에 의한 연소온도의 저하 및 관성 과급 효과를 이용하여 기관 출력의 상승을 도모한다. 또한 연료탱크 내에 가압펌프가 설치되어 연료공급라인에 항상 일정한 압력이 유지되어 냉시동이 용이하다. 더욱이 LPI 시스템의 연료분사 제어계는 더욱 정밀한 연료분사량 제어를 가능하게 하여 연비 및 배기가스 성능이 우수한 장점이 있다.

그러나 기관의 흡기관에 액체연료를 분사하는 LPI 시스템 역시 석유계 연료인 LPG를 사용하기 때문에 CO₂, CO, THC의 배출이 불가피하다. 천연가스 차량의 경우 CNG 연료공급 외에 소량의 수소를 흡기관에 첨가함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있음이 실험적 결과로 입증되고 있다^{2,3,4}.

수소는 연료성분에 탄소원자를 포함하지 않아 거의 무공해에 가깝기 때문에 탄소를 기본으로 하는 유해 배출가스인 CO, HC 등의 배기가스 저감에 탁월한 효과가 있다. 이러한 수소를 LPG 연료에 첨가한다면 LPG 차량의 유해 배출가스를 더 낮은 수준으로 내릴 수 있을 것으로 기대된다⁵⁻⁶.

따라서 본 연구에서는 LPG 액체연료의 흡기관 분사 방식인 LPI 시스템 사용에 따른 기초 성능 및 배기 성능을 위해 제작한 단기통 실험기관인 VACRE를 사용하여 동일 공급 발열량을 유지하고 수소를 첨가하여 공기-연료 당량비 및

수소 첨가율을 변화시켰을 때의 배기가스 수준을 측정하고 해석결과에 대해 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

가스 연료 사용에 따른 기초 성능 및 배기 성능을 파악하기 위한 기초실험 장치로서 단기통 실험기관인 VACRE는 제작되었다^{7,8}. 제작된 VACRE는 디젤 6기통, 12ℓ 배기량 엔진을 단기통 엔진화 하였으며, 스파크 점화시스템을 부착함으로써 전기점화기관화 하였다. 단기통 실험용 VACRE 엔진은 OHV 기관으로 배기량은 1,858cc이며 주요 제원을 Table 1과 같다.

Fig. 1은 가스연료 사용하는 VACRE기관의 기관 성능 및 배기 특성을 파악하기 위한 실험장치 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 실험용 단기통기관인 VACRE, 기관성능 측정용 동력계, 흡기 및 배기 시스템과 각부 측정장치로

Table 1. Specification of VACRE

항 목		사 양
형 식		OHV
실 린 더 수		1
실린더 내경		130 mm
행 정		140 mm
배 기 량		1,858 cc
가변 압축 범위		7 ~ 14
흡기밸브 개폐시기	개	BTDC 18°
	폐	ABDC 50°
배기밸브 개폐시기	개	BBDC 50°
	폐	ATDC 18°
공 회 전 수		600 rpm
밸브 간극		흡기 - 0.4 mm
		배기 - 0.6 mm
밸런스 샤프트 갯수		2개

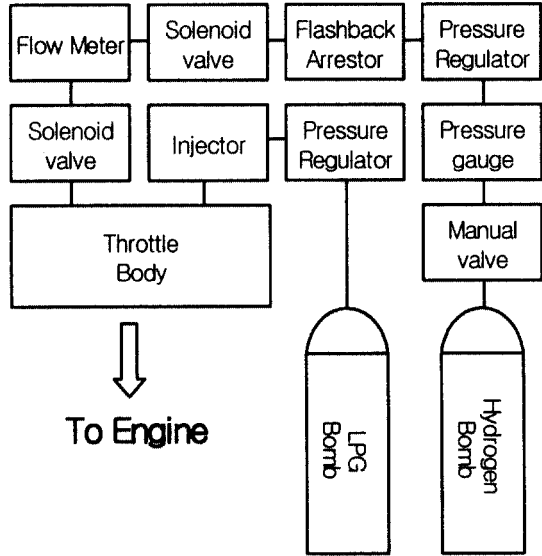


Fig. 1. Experimental apparatus.

Fig. 2. The fuel supply system.

구성된다.

기관성능 측정을 위한 130KW 동력계는 기관의 회전수 및 부하를 조절하기 위해 플라이휠 쪽에 연결했다. 기관 각부에는 오일온도, 냉각수 온도, 배기온도, 흡기부압, 배기압력 등을 측정하기 위한 센서를 부착하였다. 또한, VACRE의 흡입 맥동을 줄이기 위하여 서지탱크를 흡기구 쪽에 설치하고, 냉각수와 오일은 외장형 펌프를 사용하여 성능에 민감한 기관의 동력손실을 최소화했다. 기관의 배기특성을 파악하기 위하여 배기 분석기(Horiba 사 model Mexa-9100DEGR)를 이용했다. 배기 분석기는 CO, CO₂, THC, O₂, 및 NO_x를 기본으로 측정한다. 엔진의 크랭크축 풀리에 CPS(Crank shaft position sensor)를 설치하였다. 캠축 풀리에 홀 센서(Hall sensor)를 설치하여 이들로부터 출력된 신호가 엔진제어장치(Engine management system, Motec사 model M8)에서 연산 후 연소실에 전기에너지를 공급함과 동시에 점화시기를 제어한다.

Fig. 2는 연료공급시스템을 나타낸 것이다. LPG와 수소의 적절한 혼합이 되도록 엔진제어장치를 통하여 연료분사량을 조절한다. LPG 연

료 소모량은 질량식 유량계를 사용하여 측정하였다. 질량식 유량계의 질량저울의 분해능은 1g이다. LPG 연료에 첨가되는 수소연료는 순도 99.9%이며, 압력조정기, 유량계, 긴급차단 솔레노이드 밸브, 역화방지기를 거쳐 흡기관으로 연료를 공급한다.

2.2 실험방법

LPG엔진의 수소첨가에 따른 기관 성능 및 배출가스 성능 실험을 위한 실험 조건은 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조건에서 실험을 하였다. 기관 회전수 및 부하는 기관에 무리가 가지 않으며 최대 토크가 발생하는 회전수 및 부하를 채택하였다. 본 실험기관의 base기관은 디젤엔진이므로 상대적으로 보어가 크므로 스파크플러그에서 정상 화염면에 도달할 수 있는 거리가 멀어지게 되어 이상연소를 유발시킬 것으로 판단된다. 따라서 이상연소의 발생을 최소화 하고자 기관 압축비 8로 설정하였다.

실험변수는 공기-연료 당량비(λ) 및 수소 첨가율이며, 전반적인 실험 조건은 Table 2에 나타낸다. LPG 연료에 대한 수소의 첨가율은 다음

Table 2. Experimental condition

Test Engine	VACRE
Test Speed(rpm)	1400
Load(%)	100
Spark timing	MBT
Hydrogen supplement rate(%)	0, 10, 20
Relative air-fuel ratio	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3

(1)식으로 정의되며 기준이 되는 발열량은 각각의 공기-연료 당량비(λ)에 있어서 LPG 100%의 발열량으로 하였다.

수소첨가율(%)

$$= \frac{\dot{m}_{H_2} \times Q_{HV(H_2)}}{\dot{m}_{C_4H_{10}} \times Q_{HV(C_4H_{10})} + \dot{m}_{H_2} \times Q_{HV(H_2)}} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 CO의 배출 특성

Fig. 3은 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조건에서 공기-연료 당량비와 수소첨가율에 따른 CO의 배출 특성을 나타낸 것이다. 공기-연료 당량비를 $\lambda=0.8$ 에서 $\lambda=1.3$ 까지 증가시켜감에 따라 CO 배출은 감소하는 경향이다. LPG 연료만을 사용하였을 때와 수소를 10% 첨가하였을 때 CO의 배출은 비슷하다. 그러나, 수소를 20% 첨가하였을 때는 오히려 CO의 배출이 증가한 것을 볼 수 있다.

CO는 농후한 공기-연료 혼합기가 연료의 모든 탄소를 CO₂로 완전히 연소시키는데 요구되는 충분한 산소가 부족하여 불완전 연소되어져 다량 발생된다.

수소를 발열량비 10% 첨가하였을 때 수소의

체적은 전체 연료체적의 55%를 차지한다. 또한 발열량비 20% 첨가의 경우에는 연료체적의 85%를 차지한다. 따라서 LPG 연료는 적은 체적에 많은 질량이 집중되어 국부적으로 더욱 농후한 영역을 갖게 되는 것으로 예상된다. 수소 첨가로 인한 LPG 연료의 감소로 연소 후 탄소계 성분인 CO의 배출은 감소될 것으로 예상된다. 그러나 상기와 같은 원인에 의해 연소에 필요한 산소 요구량이 많은 수소첨가율이 높아질수록 농후 영역 및 이론공연비 부근에서 산소의 부족은 증가하여 10% H₂의 경우는 순수한 LPG 연료를 사용하였을 때와 비슷하다. 그리고 수소 첨가율 20% H₂에서는 CO 배출량이 오히려 더 늘어나는 것으로 보여 진다. 여기서 산소의 부족현상은 비체적이 큰 수소의 흡기관 첨가에 기인한 흡입공기량의 감소에 의한 것으로 생각된다.

CO의 배출은 회박영역에 이르러 충분한 산소

Fig. 3. Engine-out CO emissions versus λ ; MBT, 1400rpm, CO.

가 공급되어지면서 거의 0(zero)에 가깝게 감소한다.

3.2 THC의 배출 특성

Fig. 4는 1400rpm, MBT, WOT 및 압축비 8 조건에서 공기-연료 당량비와 수소첨가율에 따른 THC의 배출 특성을 나타낸 것이다. THC의 단위는 ppmc로 나타난다. 공기-연료 당량비를 $\lambda=0.8$ 에서 $\lambda=1.3$ 까지 증가시켜감에 따라 THC의 배출 경향은 전체적으로 수소를 첨가할 때 감소하는 경향을 나타낸다.

THC는 미연 연료공기 혼합기가 연소실내 틈새체적으로 들어가 연소시 틈 사이로 화염이 전파되지 못하다가 미연 가스가 팽창 및 배기 행정 시에 배출되는 특성으로 농후 혼합기일 때는 다량 배출된다. 또한 회박 혼합기일 때는 화염전파가 느리고 연소온도가 낮아 화염이 연소실 벽에 근접할 때 화염이 꺼져 THC의 배출이 증대

된다¹⁰⁾.

그림에서 나타난 바와 같이 농후영역에서 수소의 첨가로 탄소 성분을 포함하는 LPG 연료의 공급량이 감소하여 탄소계 배출물인 THC의 배출이 감소하는 것을 나타낸다. THC의 감소는 약 4 배 난류연소속도(H_2 난류연소속도 : 1.7m/s, C_4H_{10} 난류연소속도 : 약 0.4m/s)의 차이에 의한 영향으로 화염이 잘 전파되는 영향도 부가되는 것이라 보여진다. 그러나 농후 영역 및 이론 공연비 부근에서의 산소의 부족이 배출물에 미치는 영향은 THC에서도 나타나 $\lambda=1$ 까지 10% H_2 및 20% H_2 에서 배출량이 비슷하게 나타난다. 회박영역으로 이르면서부터는 산소의 양이 충분해져 수소첨가율을 증가시킬수록 THC의 배출이 감소하는 것을 볼 수 있다.

3.3 NOx 배출 특성

Fig. 5는 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조

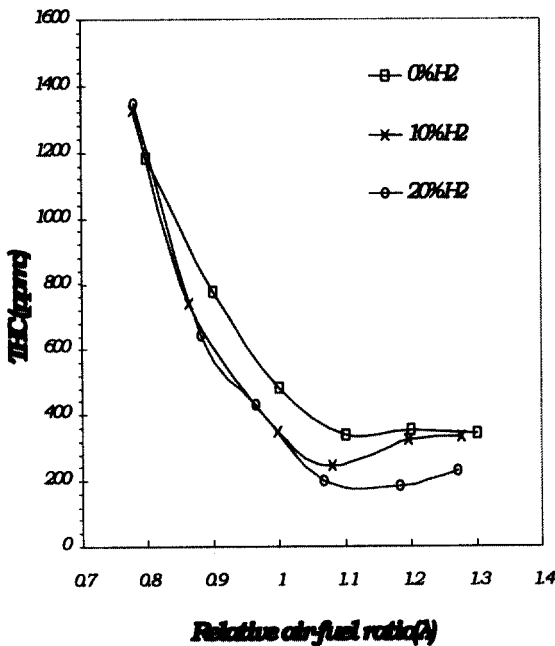


Fig. 4. Engine-out THC emissions versus λ ; MBT, 1400rpm, CO.

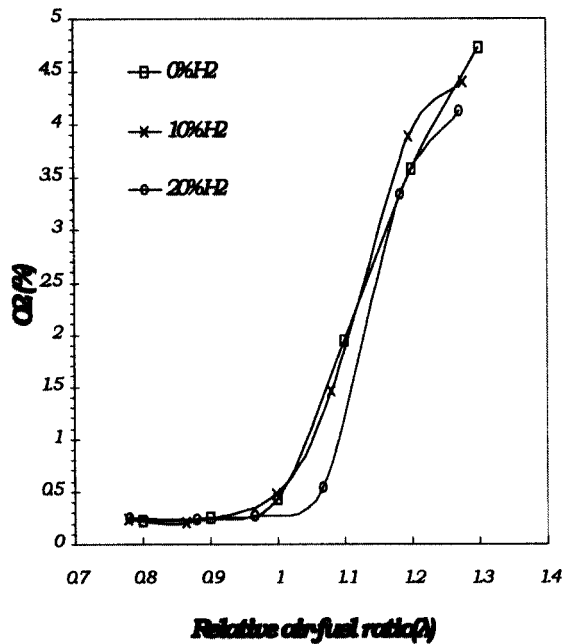


Fig. 5. Engine-out O_2 emissions versus λ ; MBT, 1400rpm, THC.

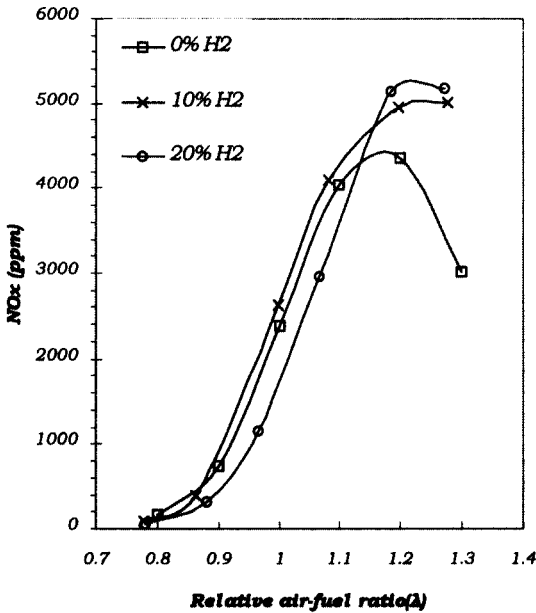


Fig. 6. Engine-out NOx Emissions versus λ , MBT, 1400rpm, CO

건에서 공기-연료 당량비와 수소첨가율에 따른 NOx의 배출 특성을 나타낸 것이다. 전체적인 경향은 공기-연료당량비 $\lambda=1.2$ 영역에서 최대가 되며, 수소첨가율에 대한 NOx 농도는 수소첨가율 10% H_2 에서는 $\lambda=0.9$ 이상이 되면서부터, 그리고 수소첨가율 20% H_2 에서는 $\lambda=1.2$ 에서부터 LPG 연료만 사용하였을 때보다 NOx 배출물의 농도 수준이 상승되는 것을 보이고 있다. LPG만은 연소하였을 때보다 수소를 첨가할 때 NOx의 배출량이 증가하는 것은 단열화염온도(H_2 단열화염온도 : 2384°C , C_4H_{10} 단열화염온도 : 약 1990°C)가 높은 수소 연료의 특성상 급속한 연소가 이루어지며 연소실내 최고 온도가 LPG만을 연소시킬 때 보다 높아지기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 수소첨가율 20% H_2 의 경우 $\lambda=0.9\sim 1.2$ 영역에서 LPG만을 사용하였을 때 보다 NOx의 배출량이 적은 것을 보면 Fig. 6에서 나타났듯이 $\lambda=0.9\sim 1.2$ 영역에서 산소의 부족으로 인한 불완전 연소로 화염이 발달하지 못하였

기 때문이라고 판단된다.

4. 결 론

LPG 액체연료를 흡기관에 공급하는 LPI 시스템을 적용한 VACRE를 사용하여 동일 공급 발열량을 유지한 경우, LPG 연료외에 수소를 첨가하여 공기-연료 당량비 및 수소 첨가율을 변화에 따른 배기특성을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CO의 배출은 공기-연료 당량비의 함수로 표현되어 λ 에 크게 영향 받아 농후하면 많이 배출된다. 특히, 수소첨가율 10% H_2 의 경우 CO_2 의 배출은 LPG 연료만 사용했을 때보다 미량 감소하지만, 수소첨가율 20% H_2 의 경우 농후영역에서 산소의 부족으로 인해 오히려 CO의 배출이 증가하는 것이 보여졌다.
- 2) 수소첨가율에 따른 THC의 배출은 전체적으로 감소한다. 특히 희박영역에서 수소첨가율을 증가시킬수록 THC의 배출량은 크게 감소한다.
- 3) NOx의 배출 농도는 수소를 첨가함에 따라 농후영역에서는 산소 부족에 기인한 불완전 연소로 감소되고 희박해질수록 높은 연소로 인해 증가한다. 특히 수소첨가율 20% H_2 의 경우 $\lambda=0.9\sim 1.2$ 영역에서 산소부족량이 증가하여 LPG만을 사용하였을 때 보다 NOx의 배출량이 크게 감소하는 것이 밝혀졌다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- 1) 김봉석, 권철홍 : “메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(I)”, SAE 953743, 1995, pp. 129-139.
- 2) 김봉석, 이영재 : “메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(II)”, SAE 96370060, 1996, pp. 156-167.
- 3) R. Sierens : "Variable Composition Hydrogen/Natural Gas Mixtures For Increased Engine Efficiency and Decreased Emissions", Sungkyunkwan univ. Seminar, 2000.
- 4) Alexandra Cattelan, Jim Wallace : " Exhaust Emission and Energy Consumption Effects from Hydrogen Supplementation of Natural Gas", SAE 952497, 1995, pp. 155-165.
- 5) 이종태, 이성열, 이재천, 김용환 : “수소엔진개발에 관한 기초연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회 강연초록집, 1988, pp. 59-63.
- 6) 이황복, 이석재, 한봉훈, 윤금중 : “수소엔진의 연소특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 추계학술대회, 1995, pp. 137-142.
- 7) 이종윤, 김상만, 이종태, 이성열 : “가변압축비 수소기관의 제작과 평가”, 한국자동차공학회 춘계학술대회 강연초록집, 1991, pp. 76-81.
- 8) 박영조 : "기계설계", 보성문화사, 1996, pp. 471-479.
- 9) Tomas Kaelblein, Y. I. Jeong and K. T. Rhee : "Knock Effects on Spark-Ignition Engine Emission and Performance", SAE 900712, 1990.
- 10) Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke : "Fundamental of classical Thermodynamics", John Wiley & Sons, Inc, 1994, pp. 382-388.
- 11) Heywood, J. B. : "Internal Combustion Engine Fundamentals". New York : McGraw Hill, 1988.
- 12) 이성열 : “내연기관”, 보성각, 1997, pp. 154.
- 13) 권병준, 이종윤, 이종태, 이성열 : “직접분사식 스파크점화 수소기관의 연소 및 성능 특성에 미치는 압축비의 영향”, SAE 933746, 1993, pp. 17-26.
- 14) H. C. Watson, L. C. Goldsworthy, and E. E. Milkins : "Cycle by Cycle Variations of HC, CO, and NOx", SAE 760753, 1976.
- 15) 이형승, 이석재, 이종화, 유재석, 김용서 : “흡기관 분사 방식 수소 연료기관의 성능 및 배출물에 관한 연구”, SAE 933747, 1993, pp. 27-33.
- 16) 김봉석, 권철홍 : “메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(I)”, SAE 953743, 1995, pp. 129-139.
- 17) 김봉석, 이영재 : “메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(II)”, SAE 96370060, 1996, pp. 156-167.