

액상 분사 LPG 엔진 성능 및 차량 배기 배출물 특성에 관한 연구

임종훈^{*1)} · 명차리¹⁾ · 박심수²⁾ · 양승주³⁾

고려대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 고려대학교 기계공학과²⁾ · 현대 오토넷³⁾

LPLi Engine Performance and Vehicle Exhaust Emission Characteristics

Jong-Hun Lim^{*1)} · Cha-Lee Myung¹⁾ · Simsoo Park²⁾ · Seung-Joo Yang³⁾

¹⁾Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³⁾Hyundai Autonet Co.,Ltd, San 136-1, Ami-ri, Bubal-eub, Icheon-si, Gyeonggi-do 467-860, Korea

(Received 3 March 2003 / Accepted 16 April 2003)

Abstract : LPG is considered as one of the most prominent alternative automotive fuels in worldwide. However, conventional mixer system can not meet the emission regulations as the mileage accumulation increased. Recently, much attention is focused on the development of LPG liquid injection fuel systems to increase the engine performance and reduce the exhaust emissions. This study evaluates the LPLi(Liquid Phase LPG injection) engine performance and exhaust emission characteristics using a 3.0 liter LPG engine. The fuel supply system and engine management system were changed from FBM into LPLi to control the precise mixture ratio and optimized spark advance.

Key words : LPLi(Liquid Phase LPG injection, 액상 LPG 분사), COV(coefficient of variation, 변동 계수), MBT(minimum spark advance for best torque)

Nomenclature

BMEP : brake mean effective pressure, bar

CCC : close coupled catalytic converter

CNG : compressed natural gas

COV : coefficient of variation

FBM : feed back mixer

FTP-75 : federal test procedure - 75

LEV : low emission vehicle

LOT : light-off temperature

LPG : liquefied petroleum gas

LPLi : liquid phase LPG injection

MBT : minimum spark advance for best torque

MCC : manifold catalytic converter

TLEV : transitional low emission vehicle

UCC : under-floor catalytic converter

1. 서론

자동차 산업의 급속한 발전과 아울러 최근 십여 년 동안 자동차 배출물에 대한 규제가 점점 엄격해지고 있고 사회적으로 환경보호, 특히 대기 보존에 대한 인식이 저변에 확산되면서 향후에도 이와 관련된 자동차 배출물 규제가 한층 첨예화될 것으로 보인다.

이렇게 환경 규제가 강화되는 추세에 따라 저공해 엔진의 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 연구의 한 방향으로 청정연료를 사용

*To whom correspondence should be addressed.
namja-1@daum.net

하여 배출가스를 줄이고자 하는 연구가 진행되고 있다. 청정연료로는 수소, 메탄올, 에탄올, CNG, LPG, Reformulated gasoline 등이 거론되고 있으며, 현재 국내에서는 LPG 연료의 저가 정책에 기인하여 LPG 차량이 상당량 보급되어 있다. 하지만 LPG 엔진의 가장 중요한 장치 중에 하나인 연료 공급 장치는 대부분의 국가에서 지금까지 믹서를 이용한 방식이 주로 사용되고 있으며, 우리나라의 경우에서도 현재 폐회로(closed loop) 제어의 기체 믹서(mixer)를 사용하고 있다. 그러나 최근에는 이러한 기존 믹서 방식보다 여러 가지 장점을 갖는 폐회로 제어 액상 분사방식에 대한 연구가 활발해지고 있다. 이러한 방식은 LPG의 분사를 정밀 제어하여 배출 가스를 줄이고, 엔진의 효율을 높이며, 또한 희박 연소를 실현할 수 있다.

따라서 이러한 LPG 액상 분사(LPLi, Liquid Phase LPG Injection) 엔진의 배출가스 성분 및 그 특성을 파악하여서 배출 가스의 적극적인 저감을 위해 노력하여야 한다. 본 연구에서는 믹서방식의 리베로 엔진의 연료공급계통을 연료펌프, 인젝터, 퓨엘레일 등을 사용하여 LPG 액상 분사 방식으로 개조하고 LPLi 전용 ECU를 설계하여 엔진 및 차량의 성능과 배출가스의 특성을 알아 보았다.

2. 시험장치 및 개발엔진

2.1 LPLi 엔진 시험 장치

Fig. 1은 LPLi 시험을 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. LPG 탱크의 액상 LPG는 외장형 LPG 펌프에 의해 공급된다. 연료 분사 압력은 압력 조절기에 의해 일정하게 유지되며 이 압력은 전체 연료라인에 일정하게 유지된다.

LPG는 연료의 압력과 온도에 의해 액상 및 기상, 또는 액·기상이 동시에 존재하게 되므로 연료의 온도와 압력변화에 따라 일정한 공연비를 유지하기 위해 압력·온도 보상 로직을 ECU에 적용하였다. 인젝터는 증기 폐쇄의 최소화를 위해 하부공급 방식의 인젝터를 적용하였다.

LPG 소모량은 공기유량계 및 공연비의 상관관계를 이용하여 측정하였고 분사압력은 약 7bar로 연료 공급라인 전체에서 액상으로 유지된다. 연료

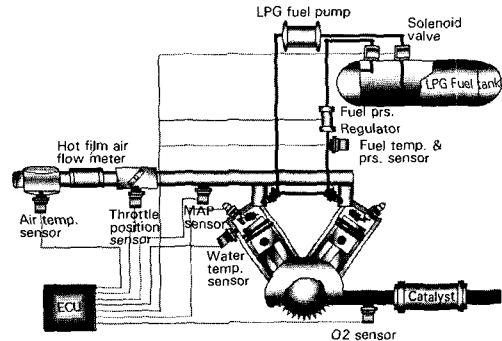


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

분사량과 점화시기는 개발중인 LPLi 전용 ECU를 이용하여 조절하였으며 연소현상 해석을 위해 Kistler사의 연소압력센서를 실린더에 설치하였고, 연소현상은 연소압력 분석장치를 이용하여 분석하였다.

2.2 LPLi 엔진 및 차량 제원

Table 1은 시험 엔진과 차량의 제원을 나타낸 것이다. 시험차량은 '2002년식 리베로이며 시험엔진은 시리우스 3.0 LPG 엔진으로 압축비는 8.9이다. 연료공급과 점화시기 제어를 위한 전용 ECU를 적용하였고, 가솔린과 같은 액상연료에 비해 가스 연료에서 요구되는 다량의 연료를 분사하기 위해 가스 인젝터 구동용 전압컨트롤 방식의 인젝터 드라이버 모듈이 내장되어 있다.

LEV(low emission vehicle) 규제 만족을 위해 촉매 장치는 기존의 UCC(under-floor catalytic converter)에 귀금속 로딩량을 개선한 MCC(manifold catalytic converter)를 추가로 설치하여 LPG 엔진 시동 시 배

Table 1 Specifications of test engine and vehicle

차 량	
Model	LIBERO
엔 진	
엔 진	Sirius 3.0S LPG
형 식	V6
배기량	2,972cc
압축비	8.9
Fuel system	MPI with injector driver module
배기 후처리제	LEV 대응 (UCC/CCC)
LPG 볼베	
용 량	80 ℓ

출되는 다량의 미연연료를 신속하게 정화하는 LEV 용 촉매시스템을 적용하였다. LPG 저장을 위한 연료탱크의 용량은 80 ℓ 로 1회 충전시 주행거리는 약 400km 수준이다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 LPLi 엔진 성능

Fig. 2는 LPLi 엔진의 성능을 나타낸 것이다. 엔진 성능은 가솔린 동급 엔진에 비해 약 5%정도 우수한 수준을 보이고 있다. 일반적으로 LPG 믹서타입의 경우 가솔린에 비해 약 10-15% 정도 성능 저하를 보이고 있다. 성능저하의 원인으로서는 1)믹서에서 공기와 기화된 LPG 연료가 혼합되어 엔진 연소실로 공급되는 실린더별 혼합기가 줄어들게 되는 원인과 2) 믹서 벤츄리 부위의 교축 작용으로 인해 흡입 공기량의 저하가 발생되어 엔진 전체에 공급되는 체적효율이 급격히 저하되어 엔진 출력에 악영향을 미치게 된다.

반면, LPLi 엔진 성능개선의 원인은 1) 미세 공연비 제어 2) 액체 연료 증발에 의한 흡기 온도 저하에 따른 체적 효율 증가 3) 액체 연료의 흡열 팽창에 의한 냉각효과로 노킹의 위험성이 적어지므로 정확한 MBT를 맞출 수 있고, 4) LPG 연료의 옥탄가가 가솔린 대비 30% 이상 높음으로 엔진의 압축비를 상승시켜 체적효율 저하에 따른 출력 저하를 상쇄할 수 있다.

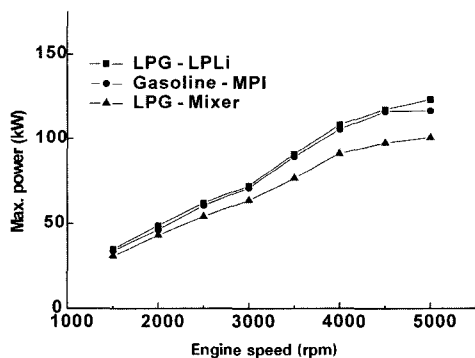


Fig. 2 Maximum engine performance

3.2 LPLi 엔진 연소현상 해석

연소현상 해석을 위하여 점화플러그 타입의 압력

센서를 #1 실린더에 장착하여, 연소압력을 측정하여 연소현상 해석을 위한 데이터로 이용하였다. Fig. 3은 각각의 엔진회전속도(rpm)에 따른 점화시기 스윙(swing) 결과를 나타낸 것으로 엔진 토크가 최대가 되고 엔진 연소 안정성에 직접적인 영향을 미치는 COV(coefficient of variation)가 최소가 되는 점화시기를 전후하여 연소현상을 해석하였고 엔진 및 차량 매핑을 위한 기초자료로 사용하였다.

Fig. 3에서 보면 점화시기가 MBT에서 벗어나면 토크는 감소하고 COV는 증가하게 되며 COV가 최소가 되는 점화시기는 엔진회전속도가 증가함에 따라 진각되며 그 수준은 2% 미만이다.

Fig. 4는 1800 rpm, 2.0 bar에서 점화 시기 변화에 따른 연소압력 곡선을 나타낸 것이다. 연소 최고 압력 P_{max} 는 점화시기가 진각 될수록 높아지고 있음을 알 수 있고 연소 최고 압력의 위치는 TDC로 가까워지는 것을 알 수 있다. 최고 압력 위치가 나타나는 지점이 TDC에 가까워질수록 연소에 따른 부피팽창이 적기 때문에 최고 압력이 높아지게 된다.

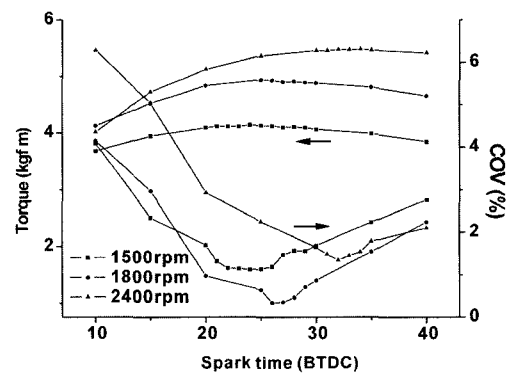


Fig. 3 Spark advance swing according to RPM

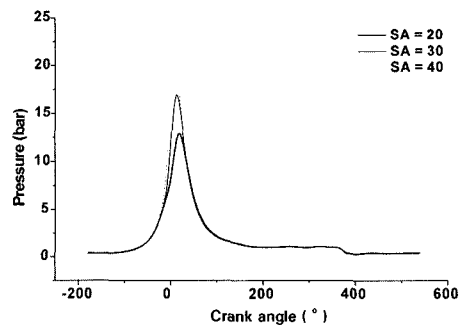


Fig. 4 Combustion pressure according to SA

또한 연소 최고 압력을 더욱 높이기 위해 점화시기를 진각시키면 엔진내 노킹이 발생하여 이상 연소 현상을 유발시키게 된다.

Fig. 5는 공연비 변화에 따른 최고 연소 압력의 변화를 나타낸 것이다. 최고 연소 압력 P_{max} 는 공연비가 농후해 질수록 높아지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6, Fig. 7은 엔진 운전 조건을 고정시킨 상태에서 세 가지 점화시기(MBT, MBT-10°, MBT-20°)에 대해 150사이클동안 θ_{pmax} 에 대한 P_{max} 과 imep의 관계를 보여주고 있다. Fig. 6에서 가장 빠른 θ_{pmax} (Fig. 6의 왼쪽 위쪽)에서 P_{max} 의 차이는 사이클간 들어오는 연료량의 차이 때문이고 이것은 점화시기가 가장 진각된 상태에서 가장 빠른 연소 사이클이다. 또한 θ_{pmax} 이 증가할수록 사이클간 P_{max} 의 편차도 증가하게 된다.

Fig. 6에서도 알 수 있듯이 점화시기 MBT-20°에서는 P_{max} 이 $\theta_{pmax}=0$ 주위에서도 나타나는데 이것은 점화시기가 너무 지각되어서 연소압력이 크랭크 각

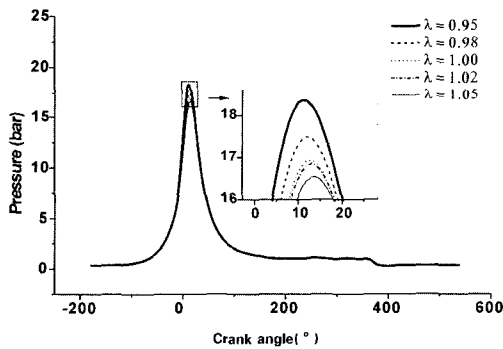


Fig. 5 Combustion pressure according to λ

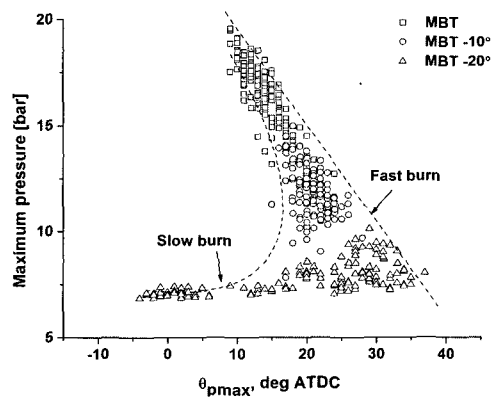


Fig. 6 Individual-cycle maximum pressure versus crank angle at which P_{max} occurs

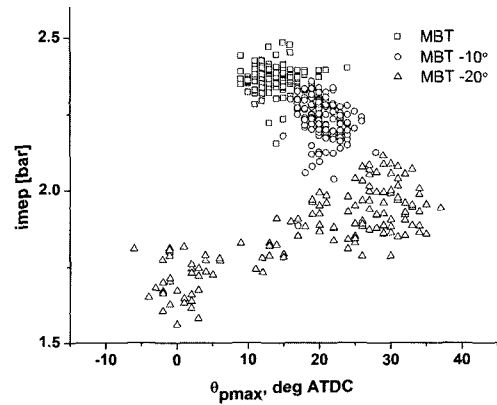


Fig. 7 Individual-cycle indicated mean effective pressure versus θ_{pmax}

이 0° 일 때 보다 작기 때문에 최고압력은 크랭크 압력이 되는 것이다. Fig. 7에서 MBT 데이터는 상대적으로 평평하고 $\theta_{pmax}=15$ 전후에 집중되어 있다. $\theta_{pmax}=15$ 이후에서는 imep가 감소하고 MBT에서 지각 될수록 imep가 감소하는 것을 알 수 있다. $\theta_{pmax}=15$ 에서 imep의 값의 상하 편차는 각 사이클 동안 실린더로 분사되는 연료량의 차이 때문에 발생한다.

3.3 LPLi 촉매 정화 효율

국내의 LPG 연료는 여름용과 겨울용으로 분리하여 프로판 함량을 최대 30% 수준까지 혼합하여 냉시동성을 개선하고 있다. 그러나 엔진성능에 직접적인 영향을 미치는 연료 분사량과 점화시기는 연료의 혼합비율에는 무관하게 단일 테이블을 사용하므로 엔진성능과 배기가스 수준은 급격히 악화되는 경향을 보이게 되고 다음과 같은 문제점을 발생시킨다. 1) 워업중(개회로)에는 매핑 값에 의존하여 연료를 제어하므로 차량간의 변위가 심하고, 2) 가·감속시의 연료량의 제어가 정밀하지 못하여 가·감속 Lean/Rich 특성에 문제가 있고, 이상연소(역좌 및 후연 등)현상이 발생하므로 배기 성능에는 악영향을 미치는 요인으로 작용하게 된다. 본 실험에서는 여름철에 상용으로 사용하는 LPG 연료를 사용하여 배기 특성과 정화효율을 평가하였다.

Fig. 8은 실용운전 영역인 1800 rpm, 2.0 bar에서 촉매 전·후의 THC와 NOx 성분의 배기 수준을 나

타낸 것이다. 두 성분 모두 $\lambda=1$ 부근에서 98% 이상 높은 정화율을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이 때 연료 분사압력과 연료온도는 일정하게 유지되고 있다. 그러나 간헐적으로 운전 공연비가 $\lambda=1$ 에서 $\lambda=0.95$ 까지 농후한 피크(rich spike)가 발생하는 현상이 관찰되며 이 경우, THC 농도가 급격히 증가하게 되는데 이의 원인은 인젝터 팁에서 발생하는 아이싱 현상으로 추정된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 세 가지의 엔진 운전 조건에서 공연비에 따른 UCC에서의 정화효율을 나타낸 것이다. THC는 $\lambda=0.98$ 에서 정화효율이 60% 수준에 머물고 있으며, 이론 공연비 영역 이상에서 98% 이상의 정화효율을 나타내고 있다.

NOx성분의 경우, $\lambda=1.02$ 에서 정화효율은 50% 수준으로 정화효율이 희박영역에서 급격히 악화되고 있음을 알 수 있다. LPG 연료의 정화효율은 가솔린에 비해 매우 좁은 정화 윈도우를 나타내고 있으

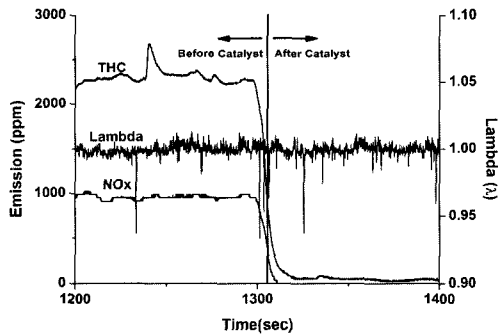


Fig. 8 Exhaust emission of raw and after catalyst

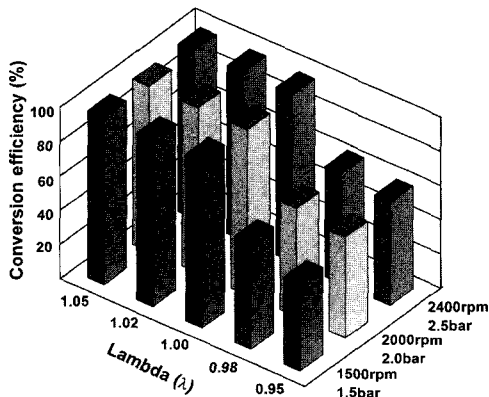


Fig. 9 Catalyst conversion efficiency of THC

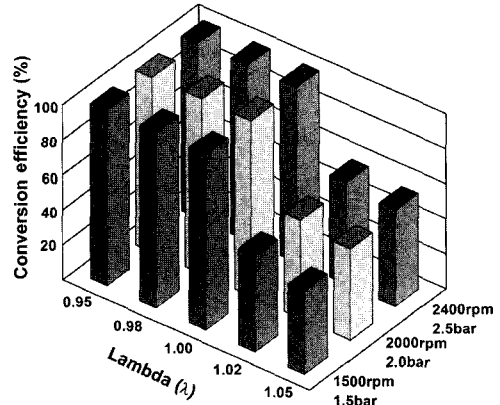


Fig. 10 Catalyst conversion efficiency of NOx

므로 LEV 규제 만족을 위해서는 미세공연비의 조절과 MCC의 적용이 요구되고 있음을 알 수 있다.

3.4 LPLi 차량 주행 시험

Fig. 11과 Fig. 12는 FTP-75 모드 주행 시, UCC (under-floor catalytic converter)와 MCC(manifold catalytic converter)를 추가로 장착한 LPLi 차량의 시동 구간이 포함된 냉시동 구간의 배기가스 수준과 공연비의 관계를 나타낸 것이다.

개발중인 LPLi 차량의 배기 정화 시스템은 UCC만을 장착한 TLEV 사양이지만 LEV 대응을 위해 MCC도 적용하였다. 배출가스는 시동 후, 약 100초 이내에 THC, CO, NOx 성분 모두 정화가 되고 있음을 알 수 있다. 가솔린의 경우, 냉간 시동 시 연료의 불충분한 기화와 차량 운전성을 고려하여 상대적으로 다량의 연료를 분사하게 되고 촉매의 활성화 온

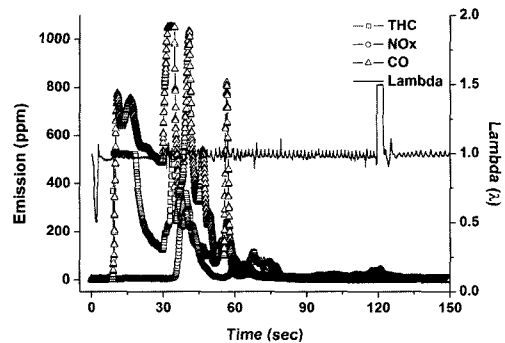


Fig. 11 Exhaust emission characteristics of LPLi vehicle (UCC Only)

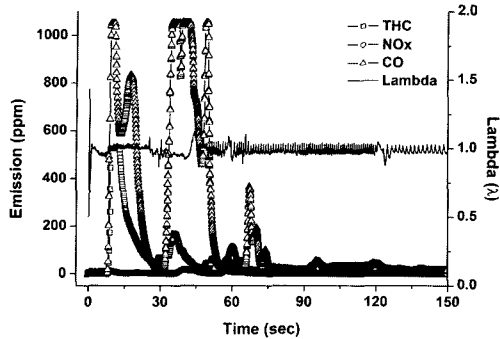


Fig. 12 Exhaust emission characteristics of LPLi vehicle (2MCC + UCC)

도(light-off temperature)에 도달하기 전에 정화가 불충분한 상태에서 대기 중으로 배출되지만, LPG와 같은 가스연료의 경우에는 흡기계의 웨팅(wetting)을 고려할 필요 없이 시동 직후부터 이론공연비 운전이 가능한 특성을 보이게 되므로 차량 배기와 연비 성능에서 매우 우수한 장점을 나타내게 된다. Fig. 11과 Fig. 12를 비교해 보면 THC와 NOx가 더욱 짧은 시간 내에 정화되고 있음을 알 수 있으며 배출량도 훨씬 줄어들고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

믹서 타입의 LPG 차량을 액상 분사식 LPG 차량으로 개조하기 위해 인젝터, 연료 펌프, 퓨얼 레일, 분사 압력 · 온도 센서를 장착하여 실험을 수행하였고, LPLi 전용 ECU를 통해 연료 분사량과 점화시기를 조절하여 엔진 성능, 차량 배기 시험 및 촉매 정화 효율 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) LPLi 엔진 성능

엔진 성능은 가솔린 동급 엔진에 비해 약 5%정도 우수한 수준을 보이고 있다. 성능 개선의 원인으로 인젝터를 사용하여 연료를 제어하므로 미세공연비 제어가 가능하고 액체 연료 증발에 의한 흡기 온도 저하에 따른 체적 효율 증가와 액체 연료의 흡열 팽창에 의한 냉각효과로 노킹의 위험성이 적어지므로 MBT를 정확히 맞출 수 있는 장점이 있다. 이상과 같은 이유로 인해 LPLi 엔진 성능은 가솔린 동급 엔진에 비해 약간 우수한 수준을 보이고 있다.

2) LPLi 엔진 촉매 정화 효율

가솔린의 경우, 냉간 시동시 연료의 불충분한 기화와 차량 운전성을 고려하여 상대적으로 다량의 연료를 분사하게 되고 촉매의 활성화 온도에 도달하기 전에 촉매정화가 불충분한 상태에서 대기 중으로 배출 하지만, LPG와 같은 가스연료의 경우에는 흡기계의 웨팅(wetting)을 고려할 필요 없이 시동 직후부터 이론공연비 운전이 가능한 특성을 보이게 되므로 배기와 연비 성능에서 매우 우수한 장점을 나타내게 된다. 실험결과 LPG 연료의 정화효율은 가솔린에 비해 매우 좁은 정화 윈도우를 나타내고 있으므로 LEV 규제 만족을 위해서는 더욱 정밀한 미세공연비의 조절이 요구되고 있음을 알 수 있다.

3) LPLi 차량 시험

FTP-75모드 주행시 MCC(manifold catalytic converter)를 추가한 LPLi 차량시험결과 TLEV 규제 뿐만 아니라 LEV 규제도 만족하고 있다. MCC를 추가했을 때 시동직후 배출되는 배기가스가 더욱 짧은 시간 내에 정화가 이루어지고 많은 양의 배기가스가 정화되고 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 고려대학교 특별연구비의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection," SAE 922363, 1992.
- 2) J. A. Caton, M. Mcdermott, R. Chona, "Development of a Dedicated LPG-Fueled Spark-Ignition Engine and Vehicle for the 1996 Propane Vehicle Challenge," SAE 972692, 1997.
- 3) J. A. Gatowski, E. N. Balles, K. M. Chun, F. E. Nelson, J. A. Ekchian, J. B. Heywood, "Heat Release Analysis of Engine Pressure Data," SAE 841359, 1984.
- 4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, pp.413-418, 1988.

- 5) K. Y. Kang, "A Heavy-Duty LPG Lean Burn Engine Using LPLi System," 2002 International Symposium on LPG Vehicles, 2002.
- 6) C. P. Pan, M. C. Li and S. F. Hussain, "Fuel Pressure Control for Gaseous Fuel Injection Systems," SAE 981397, 1998.
- 7) F. N. Alasfour, "Lean Misfire Limits of LPG Fueled SI Engine," SAE 2001-01-1960, 2001.
- 8) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, J. T. Cohen and R. Wicker, "The Effects of Fuel Composition, System Design, and Operating Conditions on In-System Vaporization and Hot Start of a Liquid-Phase LPG Injection System," SAE 981388, 1998.
- 9) Japan LP Gas Association, LP Gas Technical Comprehensive Bibliography, BoDang Press, 1981.
- 10) Y. I. Jeong, J. K. Yoon, Autoenv, HanSung University Press, 2000.