

액상분사식 대형 LPG 엔진개발

강건용, 김창업, 김창기, 이진욱, 김재한*, 정낙청*, 강주완**, 고은표**
한국기계연구원, LG Caltex가스(주)*, SK가스(주)**

Developing Heavy-duty LPG Engine using Liquid Phase LPG Injection technology

K.Y. Kang, C.U. Kim, C.G. Kim, J.W. Lee,
J.H. Kim*, N.C. Jung*, J.W. Kang**, E.P. Ko**
KIMM, LG Caltex gas co.*, SK gas co.**

1. 서론

LPLi(Liquid Phase LPG Injection) 방식은 기존의 LPG 믹서시스템(제2세대)이 LPG 액상연료를 기화시켜 믹서를 이용해서 엔진에 공급하는데 비해, LPG 연료를 연료펌프를 이용하여 가압하여 액상상태를 유지한 후 이를 이송하여 인젝터를 통해 고압 정밀 분사하는 제3세대 연료공급방식을 말한다. 이 방식의 장점으로는, 액상연료의 분사로 연료밀도가 증가하여 엔진의 출력이 믹서방식에 비해서 10~15% 상승하고, 전자식 정밀제어로 인해 배기가스 유해물질이 현저히 저감된다는 것이다. 또한 고압분사로 LPG 연료의 미립화가 촉진되어 추운곳에서의 냉시동성 문제와 워밍업 전 엔진의 토오크 불안정성 문제가 완전히 해결된다. 그리고 고압 정밀제어 연료분사로 인해 운전자가 느끼는 가속성 및 차량의 응답성이 현저히 상승한다. 따라서 지금까지 LPG 믹서차량에서 나타났었던 출력부족과 냉시동성 문제 등이 가솔린차량 수준으로 향상되며, LPG 연료가 갖는 청정성을 차량에서 그대로 구현시킬 수 있는 선진기술이라 할 수 있다.¹⁻⁶⁾

국내에서도 이러한 기술적인 발전에 따라 액상분사식 LPG 엔진의 개발연구를 1999년부터 시작하였다. 한국기계연구원을 중심으로 LPG자동차 보급협회(SK가스(주)/LG Caltex 가스(주))가 후원하고 국내 11개 기관이 콘소시엄 형태로 참여하여 3년간의 연구끝에 KL6i-TCi 라는 대형 액상분사식 LPG 엔진의 개발에 성공하였다. 본 연구사업의 목적은 동급의 경유엔진과 같은 엔진출력을 보이면서 배기가스 수준을 현저히 낮추어 유럽의 200년 규제치인 EURO-III을 만족시키는 엔진의 개발이었다. 이러한 목적을 만족시키기 위하여 액상분사식(LPLi) 연료공급방식을 국내 최초로 적용하였고 터보시스템에 희박연소방식을 채택하였다. 이에 대한 기술적인 상세한 연구결과는 이미 다른 논문에 언급이 되어 있으므로⁷⁻¹⁰⁾ 본 논문에서는 전반적인 결과위주로 소개를 하고자 한다.

2. 실험장치

2-1 엔진

대형 LPG엔진의 개발을 위하여 베이스 엔진은 경유엔진을 이용하였다. 디젤엔진이 압축비를 9.3으로 낮추었으며 경유연료시스템을 LPLi 연료시스템으로 교체하였다. 부하조절을 위한 스로틀바다가 추가되었고 엔진헤드에서 경유인젝터 대신에 점화플러그가 신설되었다. LPLi 인젝터의 장착을 위한 흡기매니홀드가 수정되었으며 각종 센서의 장착을 위하여 엔진의 많은 부분이 개조되었다. 그리고 배기가스의 처리를 위한 3원촉매장치 및 이를 산소센서에서 제어하는 ECU가 추가되었다. 그림 1 및 표 1에 엔진개조사항 및 엔진의 개념도가 나타나 있다.

표 1. 베이스 및 개조엔진의 재원

엔진	TCI LPLi engine (KL6i-TCi engine)	베이스 경유엔진
연소시스템	전기착화 회박연소방식	압축착화 직접분사방식
공기시스템	터보차저 시스템	
보어-스트로크	130-140	
배기량(리터)	11.15	
실린더 수	6	
압축비	9.3:1	16.5:1
연료시스템	LPG 액상분사방식	경유직접분사방식

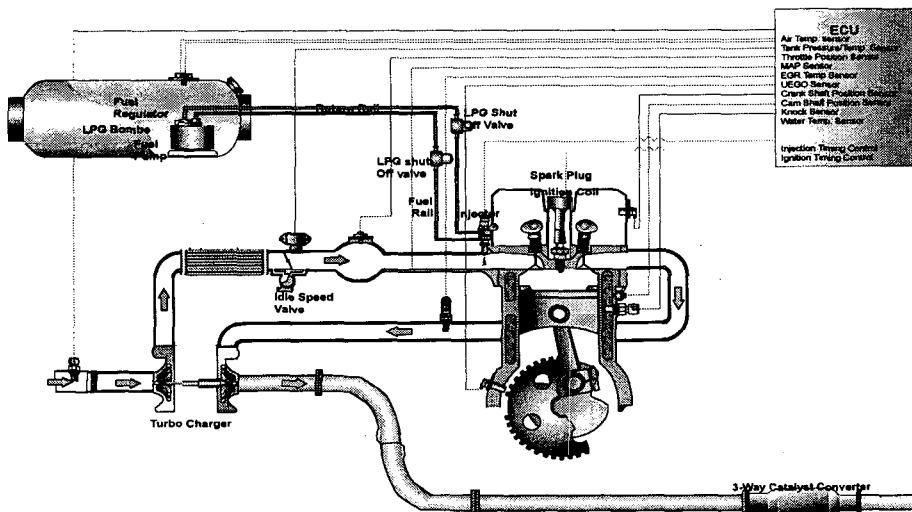


그림 1 개발된 KL6i-TCi 엔진의 개념도

2-2 엔진제어시스템

본 연구에서는 양산 적용성 및 신뢰성 확보를 위해 기존 상용 가솔린 ECU를 토대로 하여 EMS가 개발되었다. 따라서 LPG MPI 엔진의 control logic은 기본적으로 가솔린 MPI 엔진과 큰 차이점은 없다. 단지 액상 LPG 연료분사를 위한 별도의 드라이브가 기존 ECU에 추가되었고 연료공급압력의 변화에 따라 연료분사량을 보정해줄 수 있는 별도의 MAP이 추가되었다. LPLI 시스템은 가솔린 시스템과 달리 인젝터에 공급되는 연료압력이 탱크압력과 연동되어 항상 변화하기 때문에 연료압력에 의한 연료분사량 보정이 반드시 뒤따라야 정확한 공연비를 제어할 수 있다. 일반 가솔린 MPI 엔진에서 필요로 하는 센서가 대부분 사용되며 터보 웨이스트게이트 밸브제어(turbo waste gate valve control)와 노킹제어(knock control)이 추가되었고 희박연소를 위해 일반 O₂ 센서 대신에 UEGO 센서가 설치되었다. 운전방식에 있어서의 일반 가솔린엔진과 큰 차이점은 모든 운전영역에서 모두 폐회로 제어(close loop control)가 이루어진다는 점인데 이는 가솔린 엔진과는 달리 경유엔진의 배기규제모드가 전부하(full load)에 큰 영향을 받기 때문이다.

2-3엔진하드웨어성능최적화

개발된 KL6i엔진에 희박연소개념을 적용하기 때문에 이에 적합한 연소실의 구현을 위하여 여러 가지 실험을 진행하였으며 최적의 선회비, 흡입효율을 갖는 포트의 개발, 희박영역에서의 안정된 연소의 확보를 위한 연소실 형상의 확보, 연료분사의 제어를 통한 연료의 성층화로 희박운전한계의 확장 등의 연구결과를 얻을 수 있었다.⁷⁻¹⁰⁾ 이러한 연구결과 종합하여 새로운 연소시스템의 개발에 성공하여 다음의 실험을 통하여 출력 및 배기성능을 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

일반적으로 터보시스템을 이용하여 이론공연비 운전을 할 경우 고출력과 저배기를 동시에 만족시킬 수 있으나 같은 출력 대비 자연흡기방식 엔진에 비해 배기가스온도가 더 높아질 뿐만 아니라 터보시스템의 내열내구가 더 추가되기 때문에 TCI LPLI 엔진에서의 이론공연비 운전은 매우 불리하다. 따라서 본 연구에서는 최대한 배기가스 온도를 낮추고자 희박연소 방식을 TCI LPLI 엔진을 채택하였다. EGR에 의한 배기가스온도 저감도 저배기 측면에서 매우 바람직한 방식이나, 아직 상용화에 이르기까지 극복하여야 할 문제들이 많으며 온도 저감 효과도 희박연소에 비해 크지 않아 본 연구에서는 제외시켰다.

희박연소 방식으로 노킹가능성이 줄어들었지만, 프로판:부탄 비율 60:40인 연료를 사용한 점과 과급공기의 높은 온도를 고려하여, 압축비를 9.3으로 낮추었다. 터보 매칭시, 전 엔진운전영역에 걸쳐 높은 열효율 및 엔진목표 출력을 만족하기

위해서는 적절한 과급의 유지가 필요한데, 이를 위해서 전자식 waste-gate 방식의 터보 과급기를 사용하였다.

3-1 출력성능

그림 2에 압축비 9.3에 대한 WOT 실험결과를 베이스 경유엔진에 대한 실험결과와 함께 나타내었다. 최대토크는 110kgf-m, 최대출력 290마력으로 경유엔진과 동급의 결과를 보여주었다. 최대배기가스 온도는 약 700°C 이하를 유지하여 내열내구에 있어서 상당히 유리함을 알 수 있다. 그러나 TCI 엔진에서의 이러한 출력 성능은 과급량의 제어에 따라 변경 가능한 여지가 많기 때문에 큰 의미는 없고 단지 목표 성능에 맞추어 turbo mapping 된 출력성능 결과일 뿐이다. 따라서 필요하다면 내구에 지장이 없는 범위 내에서 더 높은 토크성능의 구현이 가능하다. 즉, 현 시스템에서 연료조성, 압축비, 노킹특성 그리고 배기가스 온도 등을 고려할 때 최대토크 및 출력은 각각 110kgf-m와 300마력은 무난하게 이룰 수 있는 것으로 파악된다. 열효율은 WOT 영역에서 rpm에 따라 35%~37%의 높은 값을 유지하여 연료 경제적인 측면에서 매우 경쟁력 있는 성능을 보여주었다.

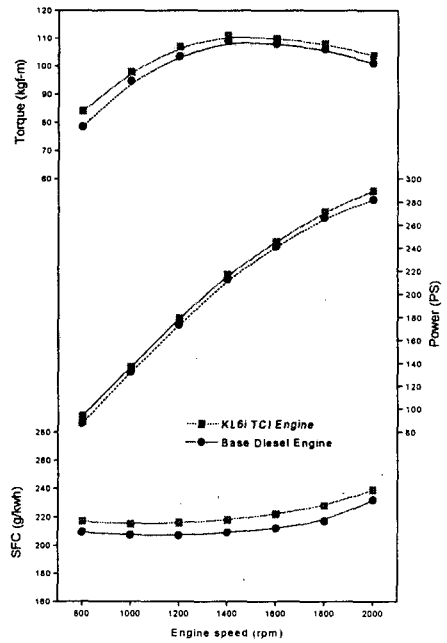


그림 2 개발엔진의 출력성능비교도

3-2 배기가스 배출성능

그림 3은 희박연소방식을 채택한 TCI LPLI 엔진의 D-13 모드 실험결과이다. 여기에는 THC와 CO 저감을 목적으로 산화촉매장치 대신 3원 촉매장치가 사용되었다. 실험결과를 살펴보면 3대 배기가스 배출물 모두 목표치인 EURO-III를 만족시킬 수 있으며 2005년 규제예정인 EURO-IV 수준도 만족함을 알 수 있다.

LPLI 방식의 희박연소 특성은 가솔린 엔진과는 달리 THC의 큰 악화 없이 오픈밸브 연료분사(open valve injection)로 성층화에 의한 희박운전한계의 확장이 가능하다는 것이다. 각 엔진운전 조건마다 최적의 분사시기를 적용하여 일반적인 원형 피스톤 형상으로 희박운전한계를 공기과잉율 1.5내지 1.55 수준으로 맞추었으며 최적의 연소실 형상을 적용한 결과, 이를 1.6까지 확장할 수 있었다. 이러한 희박한계의 확대를 통해 NOx 저감 뿐만 아니라 최고배기가스 온도의 감소도 기대할 수 있다.

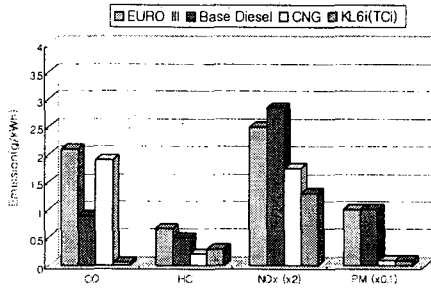


그림 3 개발엔진의 배기가스 배출성능 비교도



그림 4 개발된 KL6i-TCi 엔진이 장착되어 시범운행중인 LPG버tm

4. 결론

국내 최초로 국내 기술진에 의하여 개발된 희박연소 성층화 연소개념을 채택한 LPG 액상분사식 터보차저엔진은 EURO-IV를 충분히 만족하는 수준의 배기가스 배출성능을 보였으며 경유엔진 동급의 최대토크 110kg_r-m와 최대출력 290마력을 보이면서도 최대배기가스 온도를 700℃ 이하로 유지하기 때문에 생산 경제적인 측면에서 매우 유리하였다. 따라서 경유엔진의 대체엔진으로써 매우 매력적인 특성을 보여주고 있으며 이러한 LPG엔진은 현재 상용화를 위한 여러 가지 내구실험을 완료하고 LPG버스에 탑재되어(그림 4) 시범운행 중이다.

5. 후기

본 연구논문은 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. M. van der Steen (1996) "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations", TNO-paper VM9608
2. Bas Hollemans, L. Conti and P. de Kok, (1995) "Propane the 'Clean' Fuel as the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles" TNO-Paper VM9504
3. World LP Gas Association (1998) "Automotive LP gas Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow" 3rd edition
4. M. van der Steen, J. de Rijke and J. J. Seppen, (1996) "Stoichiometric and Lean Burn Heavy-Duty Gas Engines - A Dilemma between Exhaust Emissions and Fuel Consumption?", TNO-paper VM9605

5. Bas Hollemans, M. de Roos, L. Conti and G. Margaria (1995), "Regulated and Non Regulated Emissions of a Commercially Attractive LPG Vehicle", TNO-paper VM9502
6. J. A. Caton, M. McDermott and R. Chona, (1997) "Development of a Dedicated LPG-Fueled Spark Ignition Engine and Vehicle for the 1996 Propane Vehicle Challenge", SAE 972692
7. K. Y. Kang, D. Y. Lee, S. M. Oh, C. U. Kim, "Performance of an Liquid Phase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicles", SAE 2001-02-1958, 2001.
8. K. Y. Kang, D. Y. Lee, S. M. Oh, C. U. Kim, "A Fundamental Study on a MPI LPG Engine for Heavy-Duty Vehicles", The 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 3-02 COMODIA 2001.
9. C. U. Kim, S. M. Oh, K. Y. Kang, "Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for Heavy-duty Engine (I)", Transaction of Korea Society of Automotive Engineers, Vol.9, No.4, 2001.
10. C. U. Kim, S. M. Oh, K. Y. Kang, "Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for Heavy-duty Engine (II)", Transaction of Korea Society of Automotive Engineers, Vol.9, No.6, 2001.