

대형엔진용 액상분사식 LPG 연료공급 방식에 대한 기초연구 (1)

Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for Heavy-Duty Engine (I)

김창엽*, 오승목*, 강건용*
Changup Kim, Seungmook Oh, Kemyong Kang

ABSTRACT

LPG has been well known as a clean alternative fuel for vehicles. As a fundamental study on liquid phase LPG injection (*hereafter* LPLI) system application to heavy-duty engine, engine output and combustion performance were investigated with various operating conditions using a single cylinder engine equipped with the LPLI system. Experimental results revealed that no problems were occurred in application of the LPG fuel to heavy-duty engine, and that volumetric efficiency and engine output, by 10% approximately, were increased with the LPLI system. It was resulted from the decrease of the intake manifold temperature through liquid phase LPG fuel injection. These results provided an advantage in the decrease of the exhaust gas temperature, in the control of knocking phenomena, spark timing and compression ratio. The LPLI engine could normally operated under $\lambda=1.5$ or EGR 30% condition. The optimized swirl ratio for the heavy duty LPG engine was found around $R_s=2.0$.

주요기술용어 : Liquid phase LPG injection (LPLI, LPG 액상분사), Swirl ratio(선회비)
Knocking(이상연소), Lean burn(희박연소), EGR(배기가스 재순환)

1. 서론

액화석유가스(LPG) 연료는 이미 차량의 대체연료로서 오래 전부터 소개되어 왔으며 많은 연구와 상용화가 이루어진 상황이다. 일반적으로 LPG의 연료공급장치는 초창기의 개회로(open-loop) 제어의 기체연료 공급 방식에서 최근에는 폐회로(closed-loop) 제

어의 액상 분사방식까지 다양하게 존재하고 있다.¹⁾ 우리 나라의 경우, LPG의 소비량 측면에서는 이미 세계적인 수준이지만, 소비 기술 측면에서는 초기 수준을 갓 벗어난 폐회로 제어의 기체 믹서(mixer)를 사용하고 있는 상황이다.²⁾

유럽이나 선진 여러 국가에서는 이러한 LPG 연료의 청정성을 충분히 이용할 수 있으며 다른 연료공급방식에 비해서 많은 장점을 갖고 있는 최신의 연료공급방식인 액상분사 시스템에 대한 연구가 진행 중이다. 특히,

* 회원, 한국기계연구원 LP가스엔진연구사업단

대형엔진에 이러한 액상분사식 연료공급장치를 적용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 이미 일부 국가는 실용화에 들어가 있는 상황이다.³⁻⁷⁾ 우리 나라도 이러한 낙후된 연료공급방식 및 장치들에 대한 보완으로써, 배기 오염도가 심한 대형 디젤기관을 대체엔진으로 이러한 시스템의 적극적인 도입과 연구를 활발히 진행해야 할 필요성이 매우 절실한 것이다.

본 연구는 대형엔진에 LPG 액상분사장치의 도입을 위한 기초연구의 첫 단계로서 단기통 엔진을 이용하여 대형엔진에 LPG 연료의 적용가능성의 확인과 액상분사 시스템을 포함한 여러 가지 연료공급방식에 따른 엔진 성능비교 등의 연구를 시행하였다. 더불어 대형엔진에 적합한 선회비의 파악을 위해서 선회비 변화실험과 여러 가지 장점을 갖는 희박연소 및 EGR 기법을 적용하여 액상분사 방식의 연소특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 실험엔진은 양산 6기통 11리터급 디젤엔진을 LPG용으로 개조하여 사용하였으며, LPG용으로 개조된 사양을 Table 1에 나타내었다. 기존의 압축착화 연소방식의 실험엔진을 LPG 불꽃점화 연소방식의 엔진으로 개조하기 위해서 점화플러그 어댑터를 설치하여 점화플러그를 설치 할 수 있도록 하였으며 압축비는 기존 디젤의 16.5에서 욕조형(bathtub) 피스톤을 사용함으로써 9.3과 10으로 낮추었다.

본 단기통 엔진은 기존의 6기통 양산엔진의 5기통을 강철 평판으로 막은 후 1번 실린더만을 사용하였으며 동력계는 직류형(DC) 150kW급을 사용하였으며 동력계를 변속기 없이 엔진과 직결하여 사용하였다.

Table 1 Specifications of test engine

항목	사양
엔진형식	Inline 6기통 (1기통)
배기량	11.149 L (1858cc)
보어-행정	130 -140 (mm)
압축비	9.3, 10
연료공급방식	Mixer, Gas분사, LPLI

공연비 측정을 위한 유량측정은 공기유량의 경우, 층류 유량계(laminar flowmeter, Meriam 50MY15), 기체 LPG의 유량은 타이랜(Tylan)사의 열식 유량계를, 액상 LPG의 유량은 전자저울(balance)을 이용하여 측정하였다. 이렇게 구한 공연비는 배기라인에 설치한 광역산소센서(universal exhaust gas oxygen, UEGO sensor)에서 확인하였다. 압력 데이터의 실시간 데이터 획득 및 처리를 위해서 AVL사 Indiset 620 장치를 사용하였고, 압력센서는 S/P(spark plug)형 압력센서(AVL, GU12S)를 사용하였다.

LPG의 액상분사를 위한 인젝터는 지멘스사의 하부공급(bottom feed)형의 Deka-II 인젝터를 사용하였고 이의 제어와 점화시기 조절은 IC5460 장비를 이용하였다. 그 밖에 연료공급방식에 따른 엔진성능의 차이를 알아보기 위하여 믹서와 기상공급방식을 적용하였으며, 믹서공급방식은 2리터급 LPG 엔진의 상용믹서를, 가스분사방식은 LPG의 기화된 연료를 직접 흡기 매니홀드에 일정압력으로 분사하게 함으로써 이루어졌다. 전체적인 실험 장치도를 Fig.1에 나타내었다.

2.2 실험방법

엔진의 회전수는 1000 rpm에서 최고 회전수인 2200 rpm까지 실험하였고 주요변수들의 실험은 주로 1500 rpm 조건에서 이루어졌다. 엔진부하는 imep 6 bar와 WOT조건으로 변화

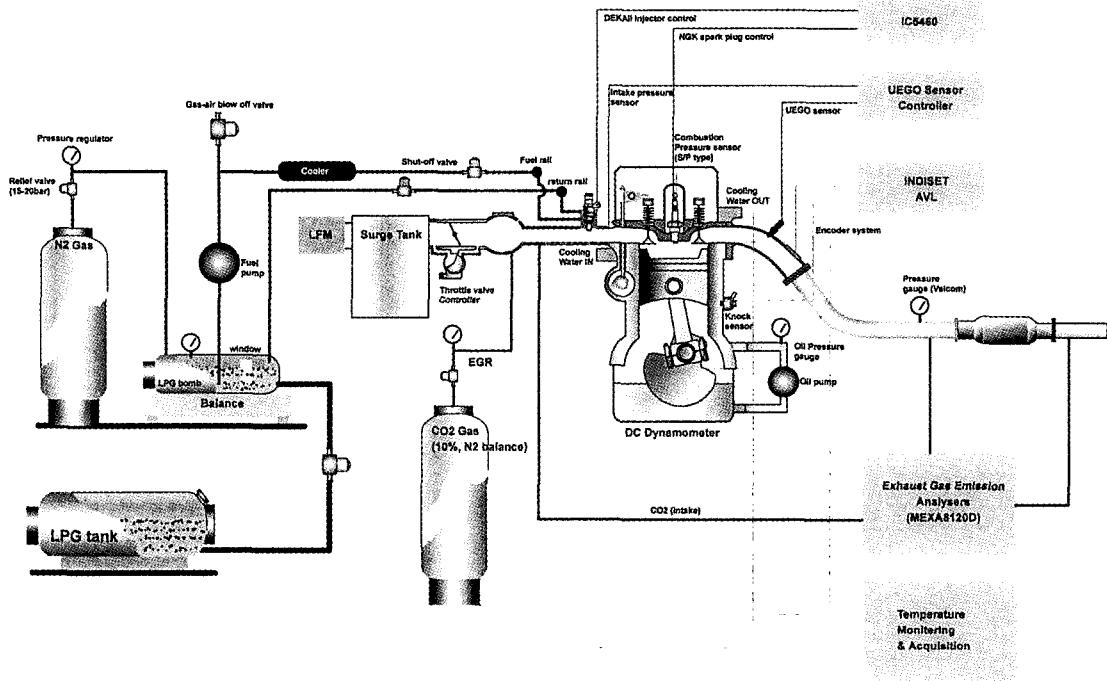


Fig. 1 Experimental apparatus

시켰으며 모든 실험조건에서 엔진냉각수 온도는 80℃를 일정하게 유지시켰다. 압력해석은 각 조건에서 300 사이클을 취득하여 해석하였고, 노킹(knocking)현상을 파악하기 위해서 가속도계 센서도 엔진에 설치하여 동시에 측정, 해석하였다. LPG의 액상유지를 위해서 연료공급라인을 질소가스를 이용해서 LPG의 액화에 필요한 압력이상으로(15 bar) 가압하여 공급하였고, 연료라인의 압력과 온도 측정을 통해 연료의 액화상태를 모니터링 하였다. 사용된 LPG 연료는 옥탄가가 높은 프로판 100% 연료를 사용하였으며, 추후 연구에서 연료조성에 대한 실험을 실시할 예정이다. 공연비는 이론공연비에서 희박한계까지 변화시켰으며, EGR은 10%의 CO₂가스를 이용한 시뮬레이션 실험을 하여 30%정도까지 변화시켰다. 그리고 대형엔진의 흡입 선회비의 최적화를 위하여 선회비 1.3, 2.0, 2.3, 2.8,

3.4의 5가지 조건의 흡입포트를 갖는 엔진헤드를 만들어 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액상분사방식의 특성

LPG 액상연료 공급을 위해서 액상연료를 사용할 수 있는 사이폰 LPG 용기를 이용하였고 가솔린용 연료펌프로 제작된 외장형 펌프로 연료를 순환시켰다. 일반적으로 LPG연료의 액상분사는 연료의 특성상 기화과정에서 주위의 공기에서 기화잠열을 빼어서 감으로써 흡기부의 온도저하 현상이 나타나게 된다. 이를 알아보기 위해서 Fig.2에 나타난 바와 같이 흡기 매니폴드부에 열전대를 4군데 설치하여 액상분사로 인한 온도변화를 측정하였으며 결과는 Fig.3에 나타내었다. LPG의 액상분사에 의한 기화열 흡수가 없는 믹서시

시스템을 이용한 연료공급을 하면 엔진의 연소실부로 가까이 갈수록 열전달에 의해서 혼합기의 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 액상분사를 이용하면 인젝터 부근에서 급격한 온도 저감현상이 발생했다.

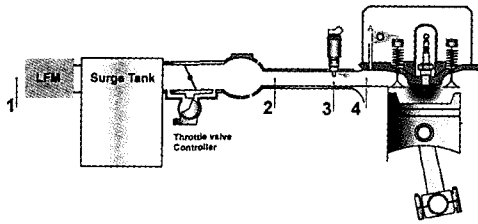


Fig.2 Measurement positions of air temperature in the intake manifold

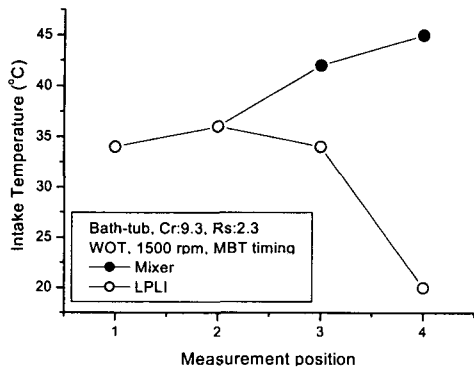


Fig.3 Temperatures in the intake manifold with LPLI and mixer system

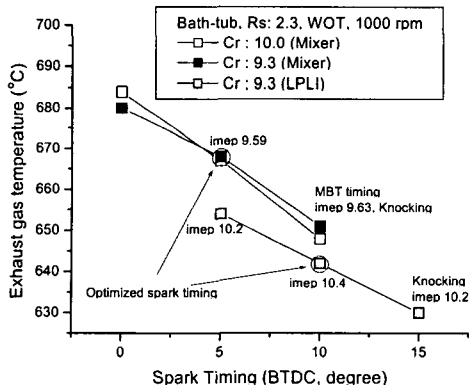


Fig.4 Exhaust gas temperatures, engine output and optimized spark timing with LPLI and mixer systems

LPLI방식의 25℃ 정도의 흡입온도 감소 효과를 엔진에서 알아보기 위하여 1000 rpm, WOT조건에서 연료공급방식을 바꾸어가며 실험을 하였고 그 결과를 Fig.4에 나타내었다. 믹서방식의 경우, 압축비 10은 물론, 9.3에서도 노킹현상 때문에 MBT 점화시기를 적용하지 못하는 반면, LPLI 방식을 적용한 결과, 흡기온도 저감으로 인한 노킹현상의 감소로 크랭크 각 5도 정도의 점화시기 진각 효과를 보여주었다. 이로써 운전조건을 MBT 점화시기에 맞출 수 있었다. 이 같은 연소실에서의 초기 혼합기 온도의 저감은 전체 화염온도의 저감으로 약 20℃ 이상의 배기가스 온도의 저감과 체적효율의 증가도 가져와서 출력 또한 평균적으로 약 10% 증가하였다.

3.2 LPG 연료공급방식에 따른 비교

위의 믹서와 액상분사 연료공급방식과 더불어 중간단계인 가스분사방식에 따른 엔진 실험결과를 상호 비교하여 특징을 Fig.5에 나타내었다. LPLI의 흡기온도 저감효과는 같은 엔진조건에서 믹서방식에 비해서 약 10% 정도의 체적효율과 출력상승을 가져왔으며 낮은 혼합기의 온도는 이런 10%정도의 출력증가에도 불구하고 배기가스 온도의 저감, 이상연소 현상의 억제 등의 효과도 같이 발견할 수 있었다. 가스분사 방식은 액상분사와 믹서방식의 중간적인 특성을 보여주었다.

3.3 선회비 변경에 따른 비교

선회비의 변경실험을 이론공연비의 일정 엔진운전조건에서 실시하여 결과를 Fig.6에 나타내었다. 같은 출력조건에서 효율은 비슷하였으나 MBT 점화시기가 선회비가 클수록 진각되었고 이로 인해 배기온도도 감소되었다. WOT조건에서는 선회비 2.0 조건에서 가장 큰 출력과 효율을 보여주었다. 그러나 이론공연비의 농후한 공연비 조건에서는 그 차이가 그리 크지 않았다.

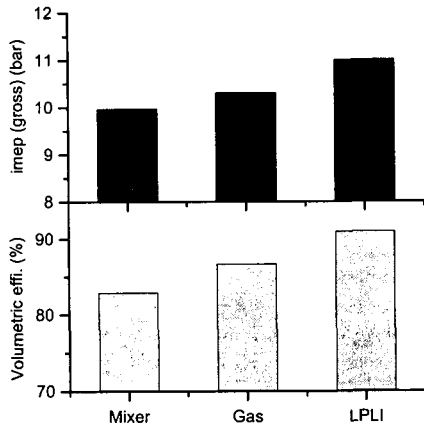
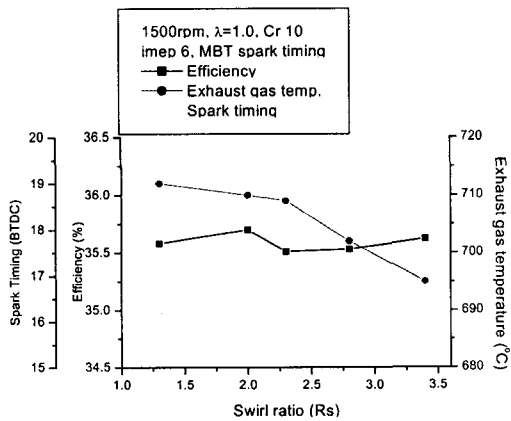
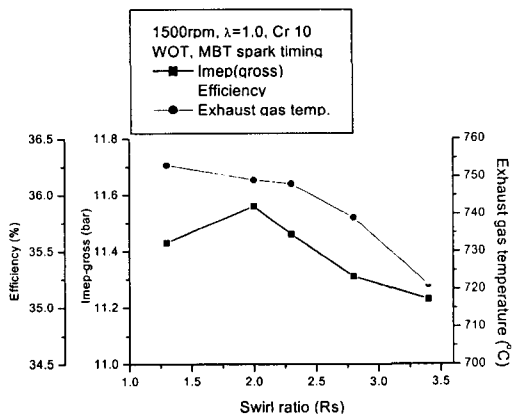


Fig.5 Engine output and volumetric efficiency with various LPG fuel supply systems



(a) imep 6 bar

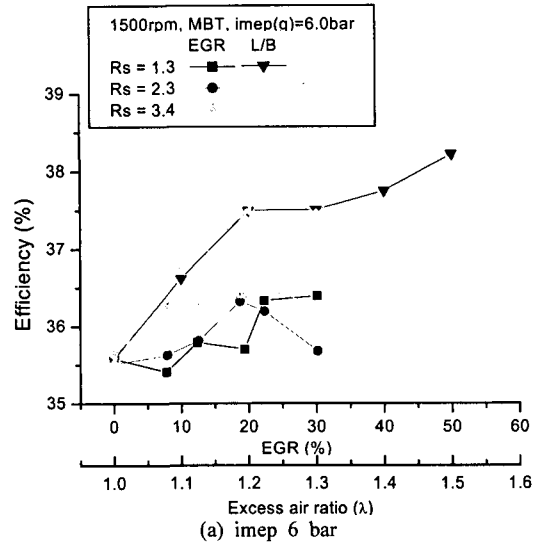


(b) WOT

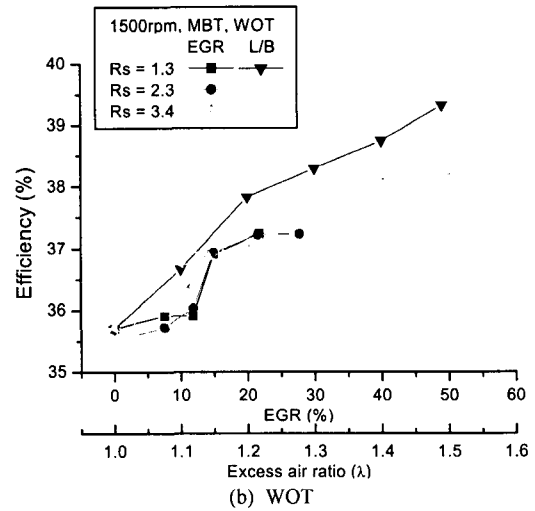
Fig.6 Combustion characteristics with various swirl ratios under stoichiometric condition

3.4 희박연소 및 EGR 기법의 도입

LPG 액상분사식 대형엔진의 연소특성을 알아보기 위해서 희박연소와 EGR기법을 도입하였고 결과는 Fig.7에 나타내었다.



(a) imep 6 bar



(b) WOT

Fig.7 Fuel conversion efficiencies with various swirl ratios under lean burn and high EGR conditions

앞서 살펴본 바와 같이 연소성이 좋은 농후한 공연비 영역에서의 선회비에 따른 엔진 성능의 차이는 작았으나 희박영역으로 갈수

록 그 차이는 커졌다. 특히 선회비 3.4의 고 선회비 조건의 경우, imep 6 bar의 중 부하영역에서 다른 선회비에 비해 일찍 희박운전한계에 도달하였는데 이는 원형으로 이루어진 연소실 형상이 압축말기에 선회유동을 깨뜨리는데 불리한 데다 과도한 선회유동이 유입되어 화염핵 생성 및 성장과정이 매우 불안정하게 됐기 때문으로 판단된다.

알려진 바와 같이, 희박연소에 의한 효율의 상승은 EGR기법의 도입으로 인한 효과보다 컸으며, 희박운전 $\lambda=1.5$ 나 EGR 30% 정도의 조건에서도 본 엔진은 정상적인 운전이 가능하였다.

대형엔진에서 LPG연료의 이론공연비 연소는 과도한 배기가스온도의 증가를 가져올 수 있다. 이를 방지하기 위한 방법으로 희박연소나 EGR기법을 도입하기도 하므로 Fig.8에는 배기가스온도에 대한 결과를 나타내었다. 희박연소나 EGR기법에 의한 배기온도의 감소효과는 거의 비슷하였으며 선회비에 상관없이 λ 의 0.1 및 EGR 10% 증가에 따라 배기가스온도 50°C 정도의 감소가 나타났다. 또한 $\lambda=1.5$ 정도의 희박연소를 하는 것이 EGR 30%의 도입보다 배기온도감소에 더 효과적이었다.

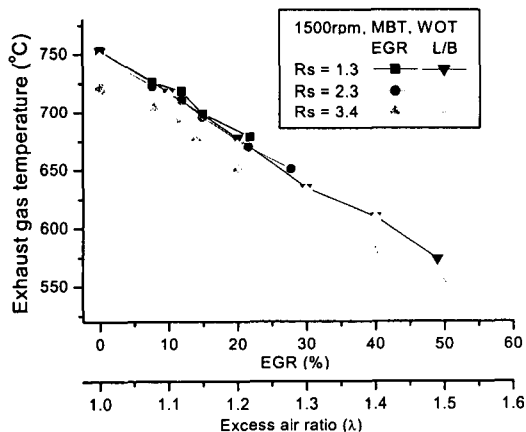


Fig.8 Comparison of exhaust gas temperatures under lean burn and EGR conditions

그러나 희박연소나 EGR의 도입은 배기가스온도의 저감, 효율의 상승 등의 효과 외에 연료량의 부족으로 인한 출력의 감소도 나타난다. 이를 Fig. 9에 나타내었다.

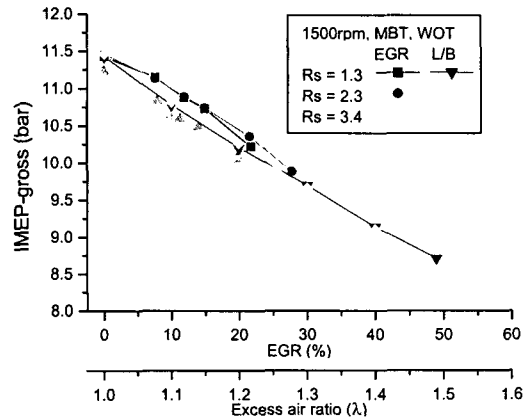


Fig.9 Comparison of engine output under lean burn and EGR conditions

공연비 및 EGR의 증가에 따라 엔진의 출력은 거의 선형적으로 감소하며 선회비에 상관없이 λ 의 0.1 및 EGR 10% 증가에 대해서 엔진의 출력은 imep 기준으로 0.6 bar 정도의 감소가 나타났다. 따라서 희박연소나 EGR의 도입은 추가적인 출력상승의 방법이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

대형엔진에 LPG 액상분사장치를 적용하기 위한 기초연구로서 단기통 엔진을 이용한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 대형엔진에 LPG 연료 적용 시, 엔진은 전상에 문제점은 발견되지 않았으며 최신의 액상분사방식을 적용한 결과, 재래식 믹서방식에 비해 기화열의 흡수로 인한 낮은 혼합기 온도를 유지할 수 있었다.

- 2) 액상분사로 인한 낮은 혼합기의 온도는 약 10% 정도의 체적효율 및 출력의 상승, 약 20℃ 정도의 배기가스 온도의 저감, 크랭크 각도 5도정도의 노킹현상의 억제 효과가 있었다.
- 3) 액상분사방식의 노킹현상의 감소는 점화시기 및 압축비의 최적화가 가능하여 이로 인한 여러 가지 엔진성능의 향상 효과도 같이 얻을 수 있다.
- 4) 대형 연소실에서의 최적의 선회비는 2.0으로 나타났으며 이 보다 과도한 선회비의 증가는 희박운전이나 높은 EGR의 적용 시, 연소의 안정성이 크게 떨어짐을 확인하였다.
- 5) 희박연소나 EGR기법의 도입은 선회비에 상관없이 λ 의 0.1 및 EGR 10% 증가에 따라 배기가스온도 50℃ 정도와 imep 0.6 bar의 감소가 나타났다.
- 6) LPG 액상분사식 대형엔진의 경우, $\lambda = 1.5$ 나 EGR 30% 정도의 조건에서도 정상적인 운전성능을 보여주었다.

후 기

본 연구사업은 LPG 자동차 보급협의회 (LG가스, SK가스)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) M. van der Steen, "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations", TNO-paper VM9608 1996.
- 2) World LP Gas Association "Automotive LP gas - Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow" 3rd edition, 1998.
- 3) B. Hollemans, L. Conti and P. de Kok, "Propane the 'Clean' Fuel as the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles" TNO-Paper VM9504, 1995.
- 4) M. van der Steen, J. de Rijke and J. J. Seppen, "Stoichiometric and Lean Burn Heavy-Duty Gas Engines - A Dilemma between Exhaust Emissions and Fuel Consumption?", TNO-paper VM9605, 1996.
- 5) B. Hollemans, M. de Roos, L. Conti and G. Margaria, "Regulated and Non Regulated Emissions of a Commercially Attractive LPG Vehicle", TNO-paper VM9502, 1995.
- 6) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, J. 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.
- 7) J. A. Caton, M. McDermott and R. Chona, "Development of a Dedicated LPG-Fueled Spark Ignition Engine and Vehicle for the 1996 Propane Vehicle Challenge", SAE 972692, 1997.