

## 액상분사식 대형 LPG 희박연소엔진의 분사시기 및 이점점화에 관한 연구

김 창 업\* · 오 승 목 · 강 건 용

LP가스엔진연구사업단 한국기계연구원

### Investigation on the Injection Timing and Double Ignition Method for Heavy-duty LPG SI Lean Burn Engine

Changup Kim\* · Seungmook Oh · Kernyong Kang

LP Gas Engine Task Force Team, Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-ku, Daejeon 305-343, Korea

(Received 7 January 2003 / Accepted 31 March 2003)

**Abstract** : An LPG engine for heavy-duty vehicles has been developed using liquid phase LPG injection (hereafter LPLi) system, which has regarded as one of the next generation LPG fuel supply systems. In this work, to investigate the lean burn characteristics of heavy-duty LPLi engine, various injection timing (SOI, start of injection) and double ignition method were tested. The results showed that lean misfire limit of LPLi engine could be extended, by 0.2  $\lambda$  value, using the optimal SOI timing in LPLi system. Double ignition method test was carried out by installing the second spark plug and modified ignition circuit to ignite two spark plugs simultaneously. Double ignition resulted in the stable combustion under ultra lean burn condition, below  $\lambda=1.7$ , and extension of lean misfire limit compare to ordinary case. Therefore, LPLi engine with optimal SOI and double ignition method could be normally operated at around  $\lambda=1.9$  and showed higher engine performance.

**Key words** : Liquid phase LPG injection (LPLi, LPG액상분사), Double ignition (이중점화), Lean operating limit (희박운전한계), Start of injection (SOI, 분사시작)

#### 1. 서 론

액화석유가스(LPG) 연료는 청정연료로 이미 오래 전부터 소개되어 왔으며 많은 연구와 상용화가 이루어지고 있다. 우리나라의 경우, LPG 차량수는 세계 1위의 자리를 차지하고 있으나 기술적인 측면에서는 초기 수준을 갓 벗어난 제 2세대의 폐회로 제어의 기체 믹서(mixer)를 사용하고 있는 상황이다.<sup>1)</sup> 그러나 최근에는 이러한 종래 방식에 비해서

여러 가지 장점을 갖는 최신의 폐회로(closed-loop) 제어 액상분사방식(LPG Phase LPG Injection, LPLi)에 대한 연구가 활발해 지고 있다. 특히, 90년대에 이 시스템을 개발한 유럽에서는 이미 실용화가 이루어 졌으며 최근 들어 우리나라, 일본, 중국 등의 아시아 국가들도 이에 대한 연구를 활발히 수행 중에 있다.<sup>2-8)</sup>

우리나라의 경우, 기계연구원의 LP가스엔진 연구사업단에서 개발을 시작한 액상분사식 대형 LPG 엔진을 비롯하여 중소형의 LPLi 차량개발과제들이 연이어 출범하면서 주요 도시지역의 대기오염의 주

\*To whom correspondence should be addressed.  
cukim@kimm.re.kr

원인인 대형 디젤기관과 종래의 LPG 믹서차량을 대체할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 또한 LPLi에 대한 연구가 활발히 진행되면서 이에 대한 많은 특-성결과들이 밝혀졌으며 현재도 여러 가지 연구 결과가 발표되고 있다.<sup>9-13)</sup>

본 연구에서는 대형 LPLi 엔진의 희박영역에서의 연소특성을 알아보기 위하여 엔진성능에 큰 영향을 미치는 인자 중의 하나인 연료분사 시작각도(start of injection, SOI)와 점화원을 2개 사용하는 이점점화방식을 도입하여 실험을 하였다. 일반적으로 SOI는 연료의 분사로 인한 혼합기의 성층화의 원인이 되는 변수이며, 이점점화방식은 일반적인 연소방식보다 빠른 연소를 가능하게 함으로써 엔진의 희박운전한계의 확장에 큰 영향을 미치는 변수이다.

이러한 변수들에 대한 대형 LPG 엔진의 희박영역에서의 성능변화를 알아보기 위하여 대형 단기동 LPLi 엔진을 이용하여 여러 가지 성능실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구의 실험엔진은 6기통 11리터급 디젤엔진을 LPG용으로 개조하여 사용하였으며, LPG용으로 개조된 사양을 Table 1에 나타내었다.

실험엔진을 LPG 엔진으로 개조하기 위해서 점화플러그 어댑터를 설치하여 점화플러그를 장착하였으며 압축비는 기존의 16.5에서 9와 9.3으로 낮추어 사용하였다. 동력계는 직류형(DC) 150 kW급으로 엔진과 직결하여 사용하였다. 공기유량측정은 증류유량계(MERIAM, 50MY15)를, 액상 LPG의 유량은 전자저울(balance)을 이용하여 측정하였다. 연소실 압력 데이터의 처리를 위해서 AVL사의 INDISET

Table 1 Specifications of test engine

항목	사양
엔진형식	Inline 6기통 (1기통)
배기량	1,858 cc
보어-행정	130 -140 (mm)
압축비	9, 9.3
연료공급방식	액상분사방식(LPLi)

620 장치를 사용하여 실시간 데이터 획득 및 처리를 하였고, 압력센서는 S/P(spark plug)형 압력센서(AVL, GU12S)를 사용하였다. LPG의 액상분사를 위한 인젝터는 지멘스사의 하부연료공급(bottom feed)형의 DEKA-II 인젝터를 사용하였고 이의 제어와 점화시기 조절은 IC5460 장비를 이용하였다. 전체적인 실험 장치도를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 실험방법

주요변수들의 실험은 엔진회전수 1200 rpm, 부하 조건은 imep 6bar (1/2 부하조건에 상당) 및 전부하 조건에서 80℃의 냉각수 출구조건을 일정하게 유지시켰다. 압력해석은 각 조건에서 300 사이클을 취득하여 해석하였고, 노킹(knocking)현상을 좀 더 자세하게 파악하기 위해서 가속도계 센서를 엔진에 설치하여 동시에 측정, 해석하였다. LPG의 액상유지를 위해서 연료공급라인을 질소가스를 이용해서 LPG의 액화에 필요한 압력으로 가압하여 공급하였고, 연료의 액상여부는 연료라인의 압력과 온도 측정을 통해 모니터링 하였다. 연소실 형상은 욕조형(bathtub type)이고 LPG 연료는 프로판/부탄비가 6/4, 2/8인 연료를 사용하였다.

분사시작시기인 SOI는 BTDC 420부터 280까지 변화시키며 엔진의 성능을 측정하였고 이점점화의 적용은 기존의 점화플러그 이외에 새로운 점화원을 연소실의 다른 장소에 설치하고 동시에 점화가 이루어지도록 점화회로에 점화 TR 및 점화코일을 추가 설치하였다. 자세한 실험장치 세팅은 본 논문의 결과해석에서 언급하기로 한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 SOI 변화에 따른 엔진성능특성

LPG 액상분사식에서는 액상의 LPG가 인젝터를 통하여 분사되어 기화되면서 연소실 안으로 들어가며 이 때에 어느 시기에 분사를 하는가가 매우 중요한 엔진성능인자가 되며 특히, 희박영역운전과 같은 불안정한 주위환경에서는 연료의 성층화로 인한 희박운전한계의 확장 등의 원인이 될 수 있다. 본 연구의 분사시기는 BTDC 420부터 280까지 변화시키며 실험을 진행하였으며 대표적인 분무기간을 Fig. 2에

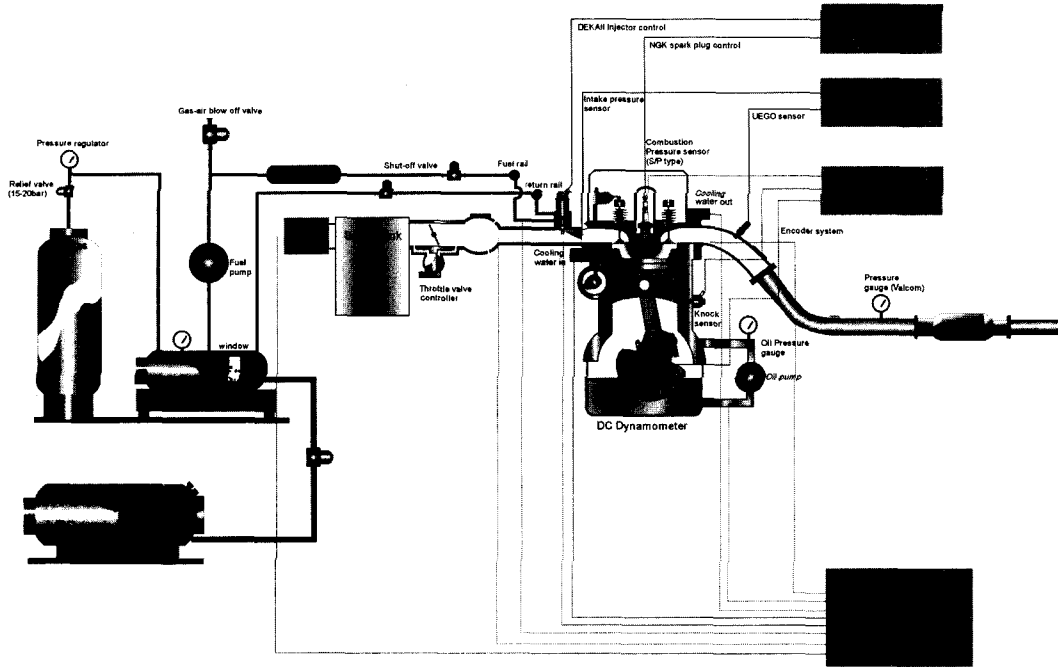


Fig. 1 Experimental setup

나타내었다.

Fig. 3에는 이러한 SOI변경에 대한 실험결과로 압축비 9와 9.3에 대해서 SOI별로 희박연소 안정성을 나타내고 있다. 희박운전의 안정성은 300사이클의 imep값의 변동성을 측정하여 5%를 넘지 않는 운전 조건으로 선정하였다. 결과에서 보듯이 각각의 경우 희박운전한계의 확장에 대해서 최적의 SOI가 존재함을 알 수 있다. 비교적 일찍 분사를 하는 경우가 가장 희박한계가 짧았으며  $\lambda=1.4$ 에서 1.5 정도의 희박한계는 종래의 LPG 연료공급시스템인 믹서와 같은 수준으로 이는 연료의 성층화가 전혀 일어나지 않는 균일 혼합기가 형성되기 때문으로 보인다. 본 실험의 결과, 최적의 분사시기는 대략 BTDC 300도 부근이며 이렇게 분사를 할 경우 일찍 분사하는 경우에 비해서  $\lambda$ 값 0.2 정도가 확장되어 희박한계가  $\lambda=1.6$ 에서 1.7 정도였다. 이 같은 결과는 SOI에 의해서 연료의 성층화가 이루어지고 있으며 이로 인해서 희박영역에서의 화염핵의 생성 및 성장이 유리하여 급속연소로 화염전파기간이 단축되기 때문으로 판단된다.

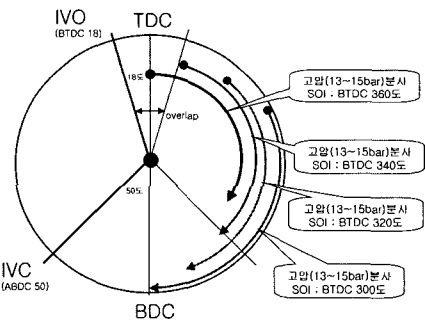


Fig. 2 Comparison of injection durations with various SOI values

Fig. 4에는 이러한 SOI변경에 따른 연소기간과 효율선도를 나타내고 있다. BTDC 300도의 최적의 SOI 조건에서 가장 짧은 연소기간을 보이고 있으며 일찍 분사가 완료되는 BTDC 420도와 비교하여 크랭크 각도로 약 3에서 5도 정도의 연소기간 단축효과가 나타나고 있다. 또한 SOI의 최적적용에 따라 희박한계가 확장되면서 희박영역에서 얻어지는 효율증가효과가 뚜렷하게 보이고 있다. 따라서 LPG 액상분사식 희박연소엔진에서 최적화된 SOI를 적용함으로써 희박한계의 확장 및 엔진효율의 향상

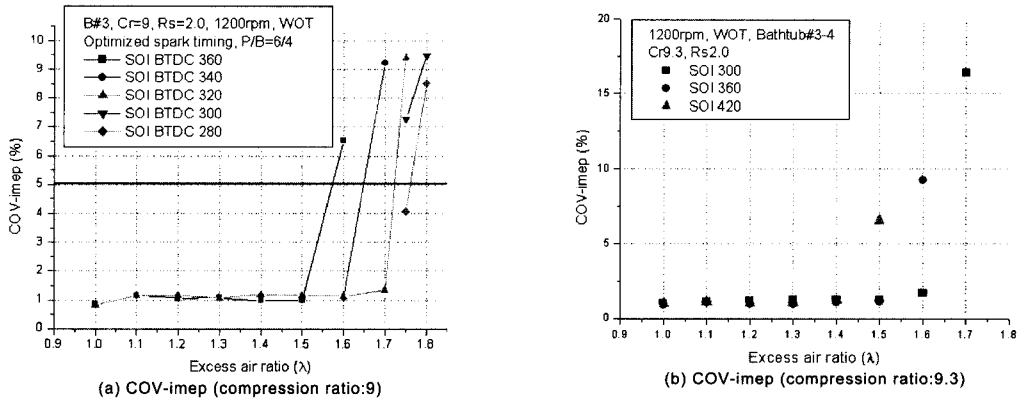


Fig. 3 Comparisons of lean operating limit with various SOI values

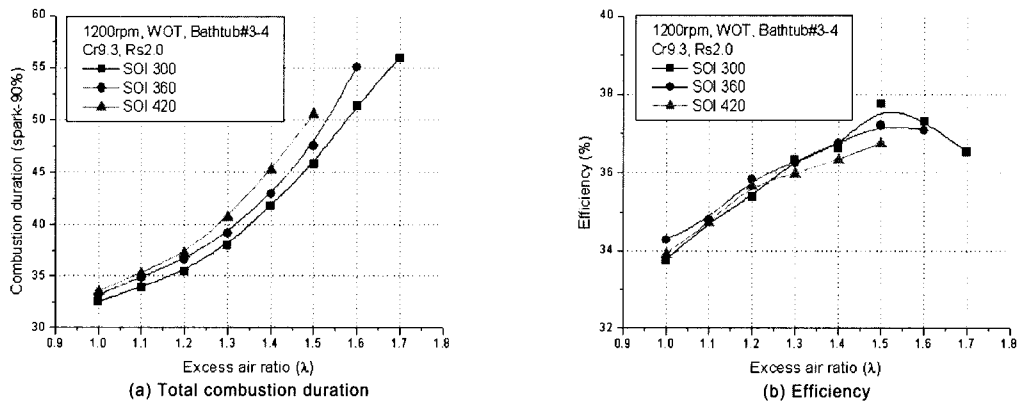


Fig. 4 Comparisons of combustion duration and efficiency with various SOI values

등의 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 이점점화에 따른 엔진특성

본 연구에서는 대형 LPG 액상분사식 엔진에서 희박영역에서의 특성파악을 위해서 이점점화방식을 적용하였다. Fig. 5와 같이 LPG용으로 수정된 엔진헤드를 추가 가공하여 기존 점화플러그에 하나의 점화플러그를 추가하였다. 이러한 이점점화원의 적용으로 인하여 같은 연소실 조건에서 급속연소를 할 수 있는 장점이 있으며 이러한 장점은 희박운전 한계의 확장, 대형엔진에서 주로 많이 발생하는 노킹현상의 감소, 희박운전에 의한 효율증가, 열부하의 감소 등의 여러 가지 이점을 보일 수 있다.

실험장치는 기존의 단독점화를 위한 점화회로에서 점화 TR과 점화코일을 1조 병렬로 연결하여 이점 동시점화가 되도록 구성하였고 예비실험을 위하

여 각각 설치된 점화플러그의 단독점화실험을 통해서 기존의 엔진과 같은 성능이 나옴을 확인하였다.

본 이점 점화실험은 압축비 9.3, 1200rpm 조건에서, 엔진출력조건은 imep=6 bar 및 전부하조건, 점화시기는 최적점화시기(MBT), 연료 SOI는 BTDC 300도로 일정하게 유지한 후 공연비를 희박영역으로 바꾸어가면서 진행되었으며 Fig. 6에 실험결과들을 나타내었다.

Fig. 6의 (a)의 연소안정성 선도에서 이점점화방식을 적용함에 따라 일점 점화조건에 비해서 급속연소로 인한 희박영역에서의 안정성이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 이러한 안정성은 imep=6 bar에서의 희박운전한계를 기존의  $\lambda=1.5$ 부근에서  $\lambda=1.9$ 부근까지 확장하였다. 이러한 연소특성차이는 이론공연비 조건보다 희박조건에서 크게 나타났으며 급속연소로 인한 연소기간의 단축은 크랭크 각도로

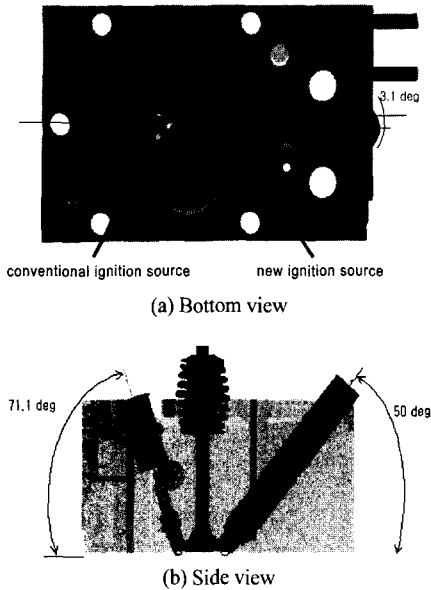


Fig. 5 Schematic diagrams of double ignition method

약 4에서 6도 정도 나타났다. 희박한계가 크게 확장됨에 따라 효율의 증가도 기존의 35%에 비해서 약 10% 증가된 38% 정도를 나타내었다. 이러한 이점점화로 인한 급속연소의 효과로 인하여 노킹의 발생억제정도는 크랭크 각도 2-3도 정도였으며 우리나라의 기존 LPG연료 조성 중에 하나인 프로판/부탄비가 2/8인 연료에 대해서도 적용 가능하였다. Fig. 6의 (d)에서 나타난 바와 같이 희박영역에서의 안정성이 뛰어나기 때문에, 부탄 80% LPG에서도  $\lambda=1.6$ 부근에서부터 MBT 점화시기를 적용할 수 있었으며  $\lambda=1.8$  부근의 희박운전한계를 보여주었다.

일반적인 일점점화의 경우, 부탄 80%의 LPG연료에서는 부탄의 옥탄가가 낮은 이유로 노킹이 증가하여  $\lambda=1.6$  부근에서는 정상적인 연소가 되지 않지만, 프로판 비율을 40%까지 올리면  $\lambda=1.6$ 에서 정상적인 연소가 가능하였다. 본 이점점화방식을 적

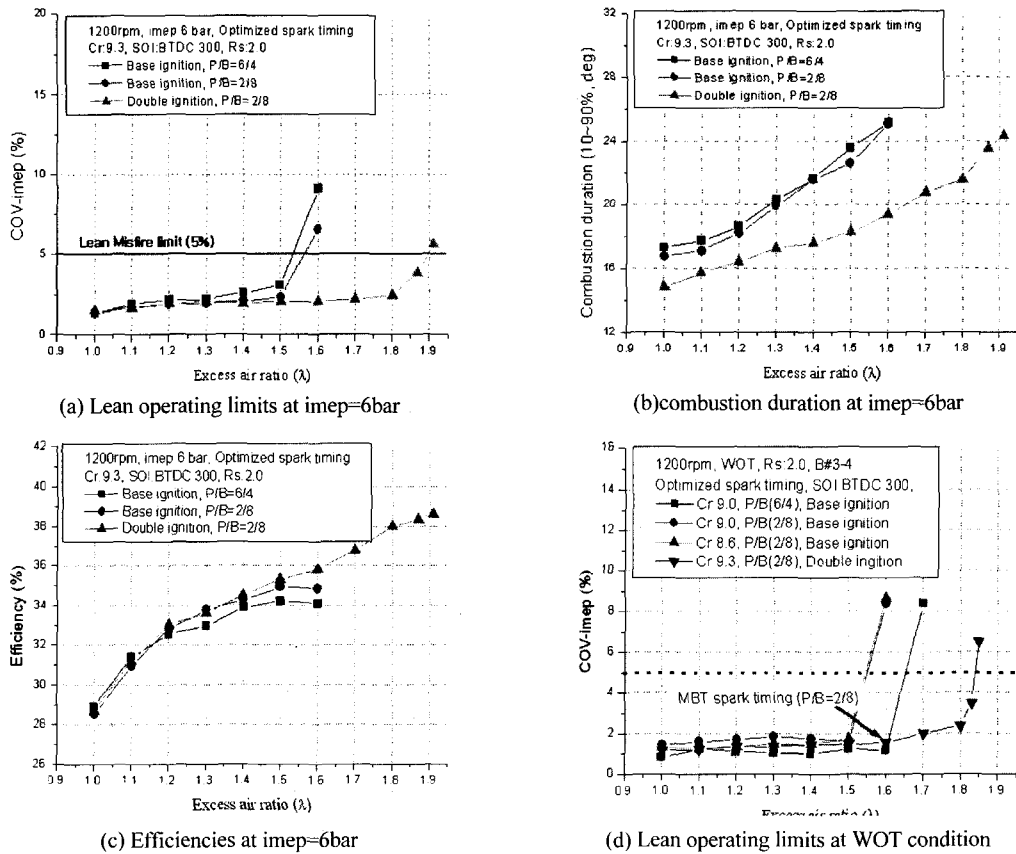


Fig. 6 Comparisons of engine performance with double ignition method

용한 경우, 부탄 80%의 경우에도 전부하조건에서  $\lambda=1.8$ 까지 정상적인 연소가 가능하여 매우 뚜렷한 성능의 향상을 보여주었다.

다라서 이점점화원을 LPG 엔진에 설치할 수 있다면 희박운전에서 얻을 수 있는 많은 엔진성능상의 이점을 얻을 수 있으며 현재의 LPG연료 조성을 그대로 이용할 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 결론

대형 액상분사식 LPG엔진 개발의 기초연구로서 희박영역에서의 특성과악을 위하여 연료분사시기 변화 및 점화원의 추가설치로 인한 이점점화방식의 도입으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) SOI는 엔진의 성능에 영향을 미치는 매우 중요한 변수로서, 특히 LPG 액상분사식 엔진에서 SOI를 조절함으로써 엔진의 희박운전한계를 종래의 믹서 방식에 비해서  $\lambda$  값 0.2 정도 확장할 수 있었다.

2) SOI 최적화에 의한 희박운전한계의 확장은 연료의 성층화에 의한 영향으로 판단되며 대형 LPG 엔진의 경우 BTDC 300 부근이 최적의 SOI값이었다.

3) 이점점화에 의한 급속연소는 대형 LPG 엔진의 희박운전한계를  $\lambda=1.9$ 부근까지 뚜렷하게 확장시켰으며 이러한 확장은 효율의 증가 및 열부하의 감소 등의 희박운전에 의한 이점을 동반한다.

4) 이점점화에 의한 급속연소로 노킹현상을 2-3도 억제할 수 있으며 부탄 80%의 일반 LPG연료의 적용도 가능하였다.

#### 후 기

본 연구사업은 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

#### References

- 1) World LP Gas Association, Automotive LP gas - Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow, Third Edition, 1998.
- 2) M. van der Steen, "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations," TNO-paper

- VM9608, 1996.
- 3) B. Hollemans, L. Conti, 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, 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, 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, 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, R. Chona, "Development of a Dedicated LPG-Fueled Spark Ignition Engine and Vehicle for the 1996 Propane Vehicle Challenge," SAE 972692, 1997.
- 8) S. Goto, D. Lee, J. Shakal, N. Harayama, F. Honjyo, H. Veno, "Performance and Emissions of an LPG Lean-Burn Engine for Heavy-Duty Vehicles," SAE 1999-01-1513, 1999.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) C. U. Kim, S. M. Oh, K. Y. Kang, "Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for Heavy-duty Engine (I)," Transactions of KSAE, Vol.9, No.4, 2001.
- 12) C. U. Ki, K. Y. Kang, "Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for

- Heavy-duty Engine (II),” Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, 2001.
- 13) B. J. Han, C. U. Kim, K. Y. Kang, C. S. Lee, “The Effect of Intake Swirl ratios on Combustion Characteristics in a Heavy-Duty LPG Engine,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, 2001.