

LPG연료품질에 따른 LPG액상분사방식의 내구특성연구

김창엽* · 오승묵 · 강건용

한구기계연구원 LP가스엔진연구사업단

Durability Properties of Liquid Phase LPG Injection System with Various Qualities of LPG Fuels

Changup Kim* · Seungmook Oh · Kernyong Kang

LP Gas Engine TFT, Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 28 May 2004 / Accepted 9 July 2004)

Abstract : The liquid phase LPG injection (LPLi) system (the third generation technology) has been considered as one of the next generation fuel supply systems for LPG vehicles, since it has a very strong potential to accomplish the higher power, higher efficiency, and lower emission characteristics than the mixer type(the second generation technology) fuel supply system. To investigate the durability property of core part of injector in liquid phase LPG injection system, leakage test, SEM test of injectors and analysis of unvaporized fuel components with various LPG fuel qualities were tested. The experimental results showed that no serious problem in durability test using favorable LPG fuel quality, while high leakage amount due to the large scratches in the needle and nozzle of the injector were found using LPG fuel with highly containing olefin components, especially butadiene species.

Key words : Liquid phase LPG injection(LPLi, LPG액상분사), Quality of LPG fuel(LPG연료품질), Durability property(내구특성), Leakage(누설), Olefin component(올레핀 성분), Butadiene species(부타디엔성분)

1. 서론

LPLi(Liquid Phase LPG Injection) 방식은 기존의 LPG 믹서시스템(mixer, 제2세대)이 LPG 액상연료를 기화시켜 믹서를 이용해서 엔진에 공급하는데 비해, LPG 연료를 연료펌프를 이용하여 가압하여 액상상태를 유지한 후 이를 가솔린엔진처럼 전자식 인젝터를 통해 고압정밀 분사하는 제3세대 연료공급방식을 말한다. 이러한 LPLi 방식의 장점으로는, 액상연료의 분사로 연료밀도가 증가하여 엔진의 출력이 믹서방식에 비해서 10~15% 상승하고, 전자식 정밀제어에 의해 배기가스 유해물질이 현저히 저감

된다. 또한 고압분사로 LPG 미립화가 촉진되어 추운 곳에서의 냉시동성 문제와 워밍업 전 엔진의 토크 불안정성 문제가 완전히 해결된다. 그리고 고압정밀제어 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. 그래서 LPG차량의 차기 배기규제인 ULEV(ultra low emission vehicle)에 대한 대응책으로 크게 주목을 받고 있다.¹⁻⁶⁾ 이에 따라 국내의 자동차 제작사들은 이러한 LPLi 시스템을 장착한 차량을 양산하여 이미 국내 판매에 들어갔거나 준비 중에 있는 실정

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

이다.

그런데, 국내에서 유통되는 LPG연료의 경우, 품질이 매우 다양한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 석유정제공장에서 경유 또는 중유를 분해하여 발생하는 분해가스(크래킹가스)로부터 분리 정제된 LPG연료에는 프로필렌, 부틸렌 등의 불포화탄화수소가 포함되어 있고, 이들은 반응성이 높아 자동차연료로 사용하는 경우에 중합(일반적으로 기화할 때 발생하며 액상으로 유지되면 발생하지 않음)하여 타르를 형성하여 다이어프램이나 기타 중요부품 등에 부착되기도 한다. 이는 믹서시스템을 사용하는 LPG엔진의 연료공급에 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 반드시 제거하여야 한다. 석유화학공장의 에틸렌 플랜트로부터 회수되는 일부 LPG연료에는 부타디엔이 포함되어 있고 이는 내유성의 고무도 녹일 수 있으며 이물질 발생시키기 때문에 자동차연료로써는 매우 부적당하다.

또한 LPG 액상분사 시스템에서는 미량이지만 LPG충전용 컴프레서로부터 혼입되는 컴프레서오일이나 LPG의 올레핀류들에 의해 용해된 고무류들이 존재하며, 액상으로 분사되기 때문에 기본적으로는 정상상태에서 부착되지 않지만 장시간 분사기 운전시에 노즐과 니들의 마찰열에 의해 기화되지 않고 노즐이나 니들부의 미세한 홈에 달라붙어 기밀을 방해할 수도 있다.

본 연구에서는 이러한 LPLi 시스템을 정착한 차량의 본격적인 보급에 즈음하여 국내 LPG연료품질이 LPLi 연료시스템의 성능에 미치는 영향 정도에 대한 기초 자료를 확보하기 위하여, 벤치형 LPLi 연료시스템을 구성하고 여러 가지 LPG연료품질에 대해서 LPG 연료분사기의 내구 및 성능특성실험을 실시하였다.

2. 실험방법 및 장치

국내의 LPG연료품질은 제조사나 수입회사, 사용 지역 및 계절에 따라서 모두 다르기 때문에, 본 연구에서는 기준으로 사용할 실험용 표준 LPG연료의 품질을 정하여 실험을 진행하였다. 이를 위하여 국내의 LPG연료품질기준을 참고로 하여 여러 가지 LPG연료의 품질을 조사하여 시중에서 자동차용으로

로 판매되는, LPG연료품질기준을 만족하는, LPG 조성(표준 LPG 실험연료 A)과, 시중에서 판매되는 LPG중 가장 올레핀 성분을 많이 함유한, 부타디엔 0%, 프로필렌 0.2%, 부틸렌 15%, LPG연료(표준 LPG 실험연료 B)를 제작하였다. 마지막으로 일반적으로 시중에서 구입이 불가능한 LPG연료조성으로 국내 LPG 품질기준대비 2배정도 올레핀이 많은, 특히 품질기준에서 언급되는 올레핀 성분인 부타디엔이 많은 LPG연료(표준 LPG실험연료 C)를 제작하여 부타디엔성분이 LPLi 부품에 미치는 영향을 비교 분석하고자 하였다. 그래서 표준 LPG실험연료 C는 연료성분 중 고무류 용해에 영향을 주는 것으로 알려진 부타디엔을 1.0%, 기타 프로필렌 1.0%, 부틸렌 10%를 첨가하여 제작하였다. 각각의 자세한 성분은 Table 1에 나타내었다.

이렇게 만들어진 표준 실험용 LPG연료를 이용하여 LPG연료품질에 따른 LPLi 시스템의 영향 정도를 확인하기 위해서는 시스템의 장시간의 운전이 필요하였다. Fig. 1은 제작된 폐회로의 LPLi 연료순환시스템이며 기본적으로 자동차의 LPLi시스템을 그대로 재현하였다. 장기간 분사되는 연료를 모아서 탱크로 순환시키기 위하여 연료레일에서 탱크로 리턴되는 연료와 합해져서 연료탱크로 순환되도록 구성

Table 1 Qualities of test LPG fuels

구분	표준 LPG 실험연료		
	A ¹⁾	B ²⁾	C ³⁾
C2H6	n.d	n.d	n.d
C3H8	1.0	1.0	n.d
i-C4H10	31.0	29.0	26.0
n-C4H10	67.0	54.4	61.0
프로필렌	0.2	0.2	1.0
부틸렌	0.5	15.0	10.0
부타디엔	n.d	n.d	1.0
i-C5H12	0.3	0.3	0.5
n-C5H12	0.1	0.1	0.5
기타	n.d	n.d	n.d
계	100	100	100

- 1) 국내에서 일반 소비자가 구입 가능한 LPG연료품질
- 2) 국내에서 일반 소비자가 구입 가능한 LPG연료품질 중 올레핀 불순물이 많은 LPG 조성
- 3) 국내에서 일반 소비자가 구입할 수 없는 것으로 LPG 국내품질기준대비 올레핀 불순물이 2배 많은 LPG

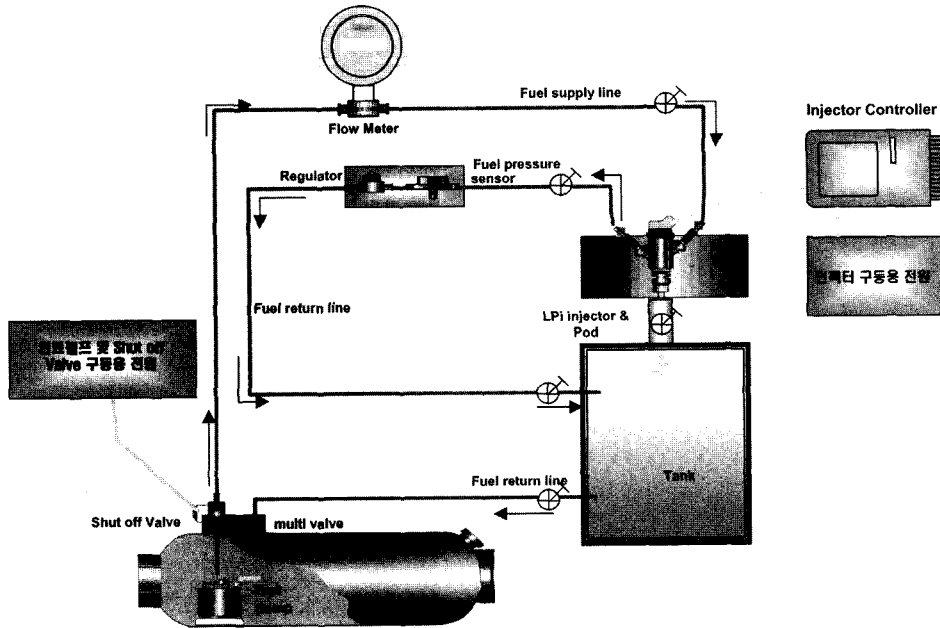


Fig. 1 Schematic diagram of LPLi durability test rig

하였다. 인젝터는 동시에 4개가 작동되도록 공용 인젝터 파드(pod)를 제작하였고, 인젝터의 구동을 위해서 인젝터 제어기를 제작하였으며 한번에 8개의 인젝터를 각각 제어할 수 있도록 하였다.

인젝터의 내구평가지 연료의 품질에 따른 인젝터의 성능변화를 비교하기 위하여 표준연료 A, B, C 연료에 대해서 내구실험은 1차적으로 1억 5천만 사이클 내구를 완료하였으며 그 후에 5억 사이클을 추가 수행하였다. 이 사이클은 인젝터 단품에 대한 내구 사이클이기 때문에 정확히 자동차의 주행거리로 환산하기는 어렵지만, 대략 자동차의 운행속도로 추정하면 1억 5천만 사이클은 약 16만km, 5억사이클은 약 50만km에 상당한다. 각 실험의 수행 전 후의 인젝터의 분사량 및 누설량을 측정하였다. 누설량의 측정은 소형 버블메터를 이용하였고, 과도한 누설량이 발생했을 경우, 이를 SEM EDS(JEOL, JSM-5800)를 이용하여 인젝터 내부의 핵심부품인 니들, 노즐을 관측하여 그 원인을 규명하였다. 또한 장시간 운전을 끝낸 LPG연료에 대한 잔류물 측정을 통해서 연료와 연료시스템에 사용된 고무류와의 반응성 여부도 함께 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 내구특성

내구실험을 진행한 4개의 인젝터에 대해 동시에 누설량을 측정할 수 있는 인젝터 누설량 측정장치를 제작하여 인젝터의 누설량을 측정한 결과, 표준연료 A와 표준연료 B에 해당하는 인젝터는 누설량에 있어서 0.2cc/min 미만으로 1억 5천만 사이클 내구실험에서는 내구실험전과 비교하여 차이를 보이지 않았다. 그러나 표준연료 C를 이용한 실험 인젝터는 Fig. 2와 같이 약 7,000만 사이클부터 인젝터들의 누설량이 급증하여 8,400만 사이클 내구부터는 모든 인젝터들의 누설량이 3cc/min에서 9cc/min 정도로 인젝터의 누설량이 너무 많아 인젝터의 기밀 유지 기능을 상실하였다.

누설증가의 원인분석을 위해서 표준연료 B와 C에서 내구실험을 했던 인젝터를 분해해서 분석해본 결과, 표준연료 B의 인젝터와 니들은 실험전과 비교하여 큰 차이가 없었으나, 표준연료 C의 인젝터는 Fig. 3과 같이 인젝터 니들과 노즐부에 불순물이 많이 끼어 있고 편마모가 되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이 불순물을 GC-MS로 분석한 결과, 이

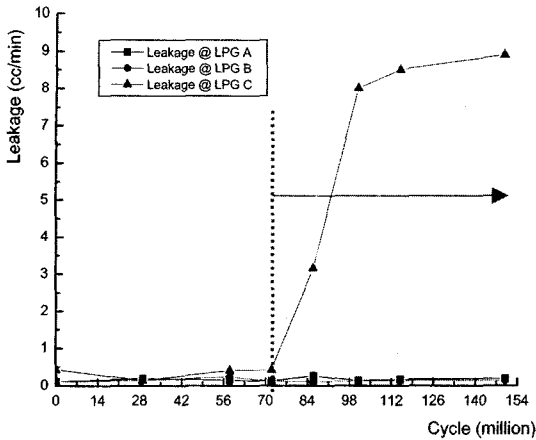


Fig. 2 Comparisons of leakage amount of the durability tested injectors with various LPG fuel qualities

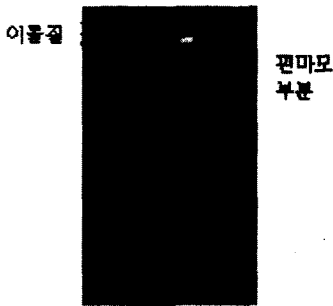


Fig. 3 Photography of injector needle after durability test with LPG fuel C

는 표준연료 C에 다량 함유되어 있는 올레핀류(부타디엔, 부틸렌, 프로필렌)가 인젝터와 연료시스템 실험장치에 사용된 O-링, 연료라인 안의 재질 등과 반응하여 고무류 성분에 포함되어 있는 여러 가지 화학 첨가제가 녹아내리며 생성된 것으로, 이들 이물질은 인젝터의 니들과 노즐의 미세한 틈새에 끼어 이들의 선접촉을 방해함으로써 누설량을 증가시키는 것으로 판단된다. 이러한 이물질에 대한 분석 결과는 Table 2에 자세하게 수록하였다. 표준연료 A와 C를 비교해 보면 이물질의 종류가 올레핀류가 많은 LPG C에서 LPG A보다 3배 이상 많이 발견된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4에는 니들과 노즐을 SEM EDS장비로 촬영한 결과를 보여주고 있다. 표준연료 LPG B로 실험한 인젝터 니들과 노즐은 내구전과 비교하여 별다른 차이점이 없었고 앞서 언급한 누설량 측정값에

Table 2 Analysis results of unknown species

종류	LPG A	LPG C
이물질 종류수	14	45
BTH (Butylated Hydroxytoluene)	✓	✓
Phenol, 2-(1-Phnylethyl)	✓	✓
Phenol, 2,4-bis		✓
Cyclohexane, isothiocyanat-		✓
1,2-Benzenedicarboxylic acid, diisooctyl ester		✓
2,6-Di-t-Butyl-4-Methylene-2,5-cyclohexadiene-1-one		✓
Acridine,9,10-hydro-9,9-dimethyl	✓	✓
2,3,5,6-Detetrahydrocyclohexano2,6-di-t-butyl-4-Hydroxymethyl	✓	
Thiourea tetramethyl-		✓
Quinoline, 1,2-dihydro-2,2,4-trimethyl		✓
Diphenylamine		✓
3,5-di-tert-Butyl-4-hydroxybenzaldehyde		✓
Benzene, 1-(1-butenylidene)bis-		✓
Benzene sulfonamide, N-Butyl-		✓
Pyrene		✓

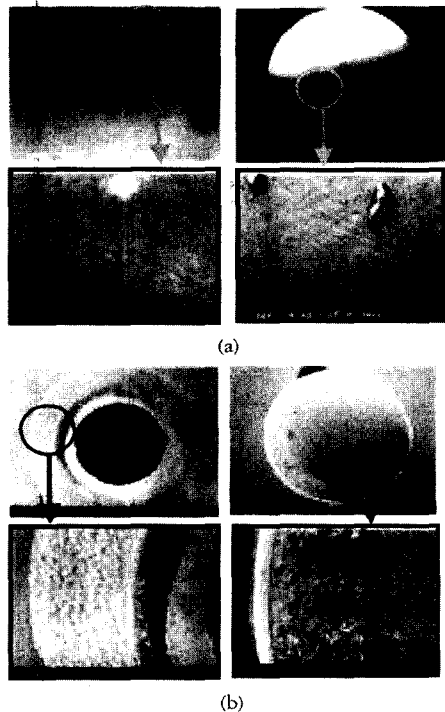


Fig. 4 SEM test results of injector needle and nozzle (a) before durability test (b) after durability test with LPG C fuel

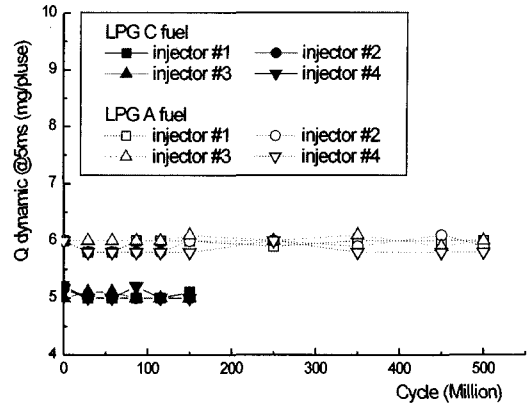
서도 별다른 차이가 없는 것과 일치한 반면, 표준연료 C로 실험한 인젝터의 경우 니들표면이 편마모가 되고, 편마모로 인하여 노즐과 니들의 접촉부위가 편심되어 꺾여 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 편마모는 인젝터의 니들과 노즐사이에 많은 틈새를 만들고 결과적으로 LPG C연료를 사용한 인젝터들의 많은 양의 연료량 누설의 원인이 된 것으로 판단된다. 따라서 LPG연료품질에 올레핀 성분들이 기준치 이상으로 많이 함유된다면, 연료시스템을 구성하는 많은 고무류와의 반응으로 이물질이 발생하며 이는 인젝터의 니들과 노즐의 편마모를 일으켜 인젝터의 기능을 상실하는 치명적인 상황이 발생할 수 있음을 본 실험을 통해 확인할 수 있었다.

3.2 잔류물 특성

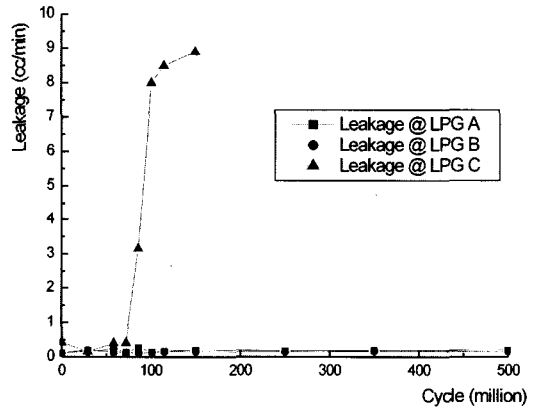
내구실험 후에 표준 LPG 실험연료의 증발잔류물 질량을 측정해 본 결과, 실험 전의 표준연료 A, B, C의 잔류물질은 0.01%이었다. 인젝터 내구실험 후 표준 LPG 실험연료 A와 B는 0.04%로 늘었지만 잔류물질 국내품질기준(0.05%)에 적합한 상태였고, 표준연료 C의 잔류물질은 0.07%로 LPG연료 내에 많은 미증발 성분이 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. 이런 불순물들은 연료 내에 녹아 있는 상태이기 때문에 연료필터나 인젝터에 부착된 필터로는 전혀 걸러지지 않는 것으로서 이러한 이물질이 인젝터 내부에 쌓여 인젝터의 노즐이 왕복 운동시 편마모를 일으켜 인젝터의 누설의 원인이 되는 것으로 판단된다.

3.3 5억사이클 추가내구실험

1억5천만 사이클의 내구실험 후에 정상적인 분사량과 누설량을 보인 인젝터들에 대해서 내구성능에 대한 한계를 알아보기 위하여 같은 연료에 대해서 추가적으로 5억 사이클까지 내구실험을 진행하였다. 측정결과 Fig. 5와 같이, 분사량 변화에서는 표준연료 A로 실험한 인젝터의 분사량 변화가 5억 사이클 경과시에도 초기값과 비교하여 변화가 없는 결과를 얻었고, 누설량 변화에서도 5억 사이클 내구후에도 누설량은 초기값과 비교하여 큰 차이가 나타나지 않았다.



(a)



(b)

Fig. 5 Amount of injection(a) and leakage(b) in durability test with various qualities of LPG fuels

이로써 LPLi 핵심부품인 인젝터에 대한 내구평가 결과, 국내 LPG연료 품질기준을 만족하는 LPG 연료를 사용할 경우에는 LPLi 시스템의 내구성이 충분히 보장됨을 알 수 있었다.

그러나 국내에서 유통되는 LPG연료의 종류가 많기 때문에 이처럼 올레핀류가 증가하여 일반적인 고무류에 대해서는 반응성이 증가하는 문제에 대한 대책이 필요하게 되기 때문에, LPLi 시스템에 사용되는 고무류는 일반적으로 내화학 반응성을 갖는 재질을 사용하는 것이 내구성능에 유리할 것으로 보이며 이러한 내화학성 재질의 고무류에는 NBR, HNBR, 바이톤, 나이론 6계열의 재질 등이 있다.

4. 결론

LPG연료품질에 따른 액상분사식 LPG 연료공급 방식에서의 인젝터 내구성능 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) LPLi 연료시스템 중 인젝터에 대한 내구실험(1억5천만 사이클)결과, 국내 LPG연료품질기준을 만족하는 LPG연료를 사용할 경우에는 LPLi 인젝터의 내구성이 충분히 보장됨을 확인하였으며 추가 5억 사이클 내구실험 후에도 분사량 및 누설량의 변화가 없는 것으로 나타났다.
- 2) LPG연료품질 규제치를 벗어나 올레핀류가 과다 증가하게 되면, LPLi 시스템에 사용되는 일반적인 고무류에 대해서 반응성이 커지게 되며 발생한 이물질이 인젝터의 노즐부에 쌓임으로써 연료의 누설량이 증가하는 현상이 발생하였다. 따라서 LPG 연료품질에 대한 철저한 규제가 필요하며 안전상 LPLi 시스템에 사용되는 고무류 및 연료라인 등의 재질은 NBR, HNBR, 마이톤, 나이론6 등의 내화학반응성을 갖는 제품을 사용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과기부의 NRL 및 환경부의 ECO사업의 지원 아래 이루어 졌습니다. 이에 저자일동은 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) M. van der Steen, "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations," TNO-Paper VM9608, 1996.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) C. U. Kim, D. Y. Lee, S. M. Oh, K. Y. Kang, H. M. Choi, K. D. Min, "Enhancing Performance and Combustion of an LPG MPI Engine for Heavy Duty Vehicles," SAE 2002 International Congress and Exposition, 2002-01-0449, 2002.
- 5) S. M. Oh, S. G. Kim, C. S. Bae, C. U. Kim, K. Y. Kang, "Flame Propagation Characteristics in a Heavy-Duty LPG Engine with Liquid Phase Port Injection," SAE International 2002 Spring Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, 2002-01-1736, 2002.
- 6) 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.