〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.4.272

LPG액상분사식(LPLi) 엔진에서 연료와 연료공급계통 고무류 부품사이의 반응성 연구

김창업† · 박철웅* · 강건용*

(2008년 12월 26일 접수, 2009년 2월 27일 수정, 2009년 3월 9일 심사완료)

Reaction Characteristics of LPG Fuel and Rubber Parts of Fuel Supply System in Liquid Phase LPG Injection (LPLi) System

Chang Up Kim, Cheol Woong Park and Kern Yong Kang

Key Words: LPLi(LPG액상분사방식), Residue(잔류물), Sulfur(황), Injector(분사기)

Abstract

The liquid phase LPG injection (LPLi) system (the 3rd generation technology) has been considered as one of the most promising fuel supply systems for LPG vehicles. To investigate the reaction characteristics of LPG with rubber parts in LPLi system, various rubbers were tested. The results showed that the amount of residue from the cover rubber of a fuel pump was increased about 10 times after testing. Furthermore, the amount of sulfur and nitrogen species which are considered as main sources of deposit formation in LPLi fuel injectors were also found to be higher than those in original LPG fuel. In addition, these residues made the core parts of LPLi injector such as needle and nozzle, partially worn, which eventually causes leakage in LPLi injectors.

1. 서 론

세계적으로 대기오염물질의 주요 원인인 자동차 배출가스 규제를 강화하려는 움직임이 계속되고 있다. 이에 따라 고효율 및 저공해성을 목표로 하는 청정가스연료의 사용이 늘고 있으며 그 중의 하나인 LPG의 사용 또한 증가하는 추세이다. LPG자동차의 경우, 전 세계적으로 매년 10%의 성장세를 보이며 2007년 기준 약 1300만대 이상의 차량이 운행 중이다. 우리나라의 경우도 2008년 10월 기준으로 230만대를 넘어서서 세계 1위의 LPG자동차 보유대수를 보이고 있다.(1)

[이 논문은 대한기계학회 2008년도 추계학술대회 (2008. 11. 5.-7. 용평리조트) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원 그린동력연구실
E-mail : cukim@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7376 FAX : (042)868-7305
* 한국기계연구원 그린동력연구실

LPG자동차는 기술적으로 LPG연료를 공급하는 방식으로 나뉘며, 현재 종래의 피드백 믹서(제2세대)기술에서 최신의 제3세대 LPG액상분사(Liquid Phase LPG Injection, 이하 LPLi)기술로 발전하였다. LPLi방식은 연료탱크의 LPG연료를 전용연료펌프를 이용해 LPG의 포화증기압보다 높은(5기압 이상) 압력으로 가압하여 연료레일까지 액상상태로 공급한 후, 연료인젝터에서 이를 정밀 분사하는 방식으로, LPG액상연료의 분사로 기상연료에 비해서 연료밀도가 증가하여 엔진출력이 믹서방식에 비해서 10~15% 상승하고, 추운 곳에서의 기화가 안 되는 기존의 냉시동성 문제와 워밍업 전 엔진의 토크 불안정성 문제가 완전히 해결되는 장점이 있다. 또한 전자식 정밀제어의 적용이 가능하여 엔진 유해배출가스물질이 현저히 저감되며, 운전자가 느끼는 가속성 및 차량의 응답성이 상승한다. 따라서 LPLi기술을 이용하면 지금까지 LPG믹서차량에서 나타났었던 출력부족과 냉시동성 문제 등이 가솔린차량 수준으로 향상되

Table 1 Components of test LPG fuels

Components	Test LPG fuel	
	A	B
iso-butane	35.0	28.3
n-butane	64.0	66.0
Propylene	0	0.2
Butylene	1.0	5.0
Butadiene	0	0.5
Total	100	100

며, LPG연료의 청정성을 차량에서 그대로 구현시킬 수 있다.[2~6] 그러나 우리나라의 LPG연료는 파라핀 계열과 올레핀 계열의 연료가 다양하게 섞어서 존재하며, 차량 외부에서 이물질이 첨가되는 등 LPG자동차용 연료품질이 다양한 현실에서, LPG연료가 액상으로 장기간 연료탱크, 연료펌프, 연료라인, 연료레일 등에 머무르게 됨으로써 연료시스템을 구성하는 고무류 재료와 반응을 일으키는 문제점이 발생할 수 있다. 특히 이러한 반응으로 인하여 발생하는 이물질들은 LPLi시스템의 핵심부품이라 할 수 있는 연료펌프나 연료 인젝터에 퇴적됨으로써 심각한 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다.[7]

이에 본 연구에서는 LPLi연료시스템을 구성하는 대표적인 고무류와 LPG연료와의 반응성 및 이로 인해 발생하는 이물질에 대한 정보를 일정기간의 LPG연료와의 반응실험을 통하여 알아보고자 하였다.

2. 실 험

2.1 실험방법 및 장치

LPLi연료시스템을 구성하는 대표적인 고무류와 LPG연료와의 반응성 및 이로 인해 발생하는 이물질에 대한 연구를 위하여, 실험용 LPG연료, 시편 및 반응기를 제작하였다.

2.1.1 실험용 LPG연료

일반적으로 LPG자동차용 충전소의 연료는 LPG제조사나 수입사의 대표성을 나타내기 어려운 혼합연료이므로, 본 연구에서는 국내 LPG연료 품질규격을 참고로 실험용 LPG연료를 제작하였다. Table 1은 제조된 LPG연료의 성분분석표이다.

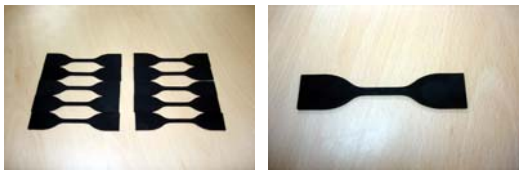


Fig. 1 Photographs of test rubbers

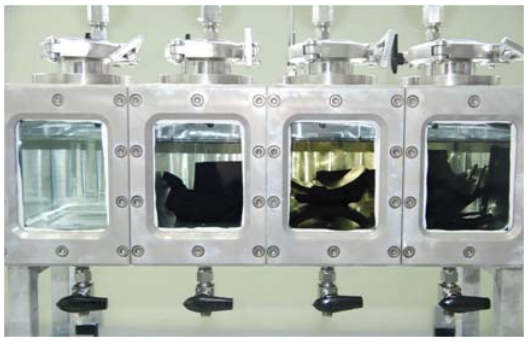


Fig. 2 Photograph of reaction test rig

Fig. 3 Photograph of residue test

2.1.2 반응장치 및 분석방법

실험용 고무류는 LPLi연료시스템을 구성하는 연료펌프커버, 연료라인, 연료레일을 선정하여 동일한 크기의 시편을 제작하였고(Fig. 1) Fig. 2에는 이들 시편 6개씩을 LPG연료 A, B와 장기간 반응성 실험을 할 수 있도록 제작된 반응장치의 모습을 나타내었다. 시편과 LPG연료와의 반응은 3개월 동안 진행하였고, 3개월 후 동일시점에서 고무시편이

침적된 LPG연료 중 100ml의 액상 LPG시료 일정량을 Fig. 3처럼 플라스크에 담았다. 채집된 LPG연료을 상온에서 24시간 자연증발 시키면서 증발되지 않는 잔류물를 얻었으며, 이 잔류물들은 무게 측정을 거쳐 일정량을 GC-MSD(GC-질량분석기), 황(sulfur), 질소화합물(Nitrogen) 분석기 등을 이용하여 정성, 정량 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잔류물 평가실험

Fig. 4는 고무시편을 넣지 않은 LPG연료, 시편으로 반응이 된 3개의 LPG연료 및 내구용 벤치 연료시스템에서 4개월 사용된 후 채집된 LPG연료까지 5개의 LPG연료를 앞서의 실험방법에 의해 실험되어 분석한 결과이다. 분석결과, 베이스 연료에 비해서 연료펌프커버 시편이 반응된 연료에서 약 10배 이상의 잔류물이 검출되었고, 연료라인, 연료레일 및 4개월 반응된 연료에서는 상대적으로 거의 같거나 2배 정도의 잔류물 증가가 나타났다.

LPG A, B연료와의 차이는 전체적으로 LPG A보다 올레핀 성분이 많은 LPG B가 좀 더 많은 잔류물이 검출되었으나, 그 차이는 미미하였다. 이는 잔류물의 생성이 LPG연료품질 자체보다는 LPG연료와 반응을 하는 재질사용이 더 큰 원인으로 판단되며, 특히 GC분석결과, 생성된 잔류물의 주성분은 고무류 제조시 일반적인 첨가제로 들어가는 고무가소제로서 Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DOP, dioctyl phthalic acid) 성분이었음을 확인하였다.

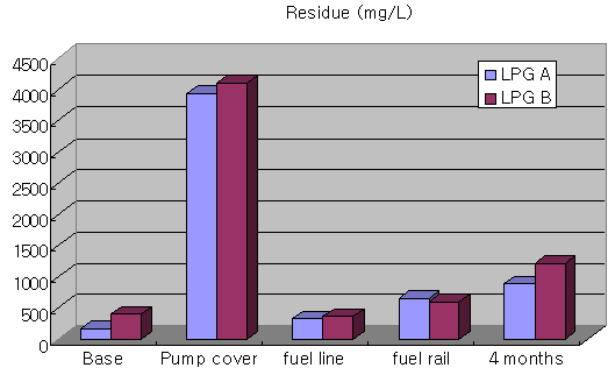


Fig. 4 Comparison of LPG residues after reaction test

3.2 잔류물 성분 분석실험

황성분은 주로 LPG연료의 고분자물질과 반응하여 연료시스템에 퇴적물 형태로 남음으로써 연료시스템의 기능이상을 일으키는 물질로 알려져 있다. 채집된 잔류물에서 황성분만을 분석하여 이를 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 잔류물과의 높은 상관관계를 보이며 베이스에 비해서 20배 이상의 많은 황성분이 연료펌프커버 고무에서 발견되었다. 4개월 이상 반응된 LPG연료에서도 많은 양의 황이 검출되는 것으로 보아, LPLi연료시스템에서의 계속적인 고무류와 LPG연료와의 반응은 많은 황의 생성을 일으킬 것으로 판단된다.

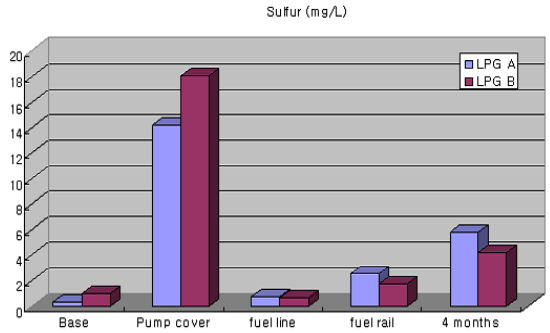


Fig. 5 Amount of Sulfur species in LPG residues after reaction test

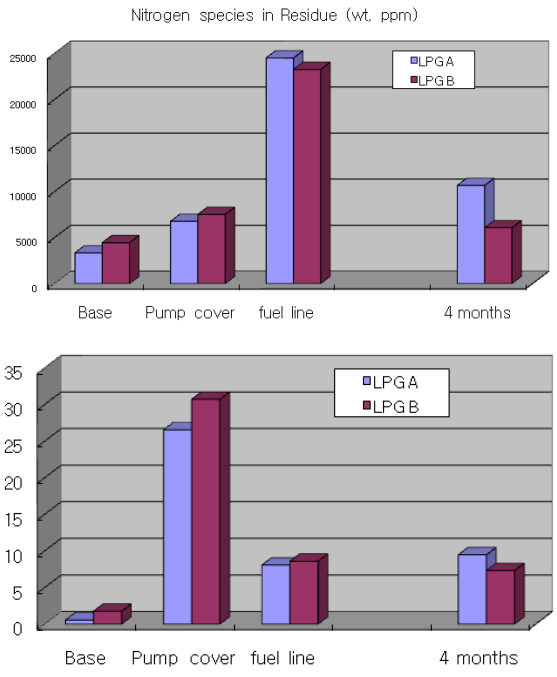


Fig. 6 Amount of Nitrogen species in LPG residues after reaction test

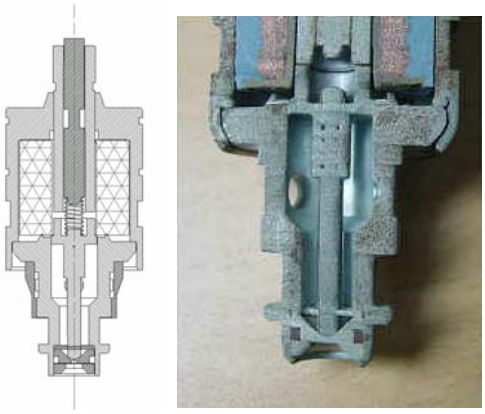


Fig. 7 Internal structure of LPLi fuel injector

Fig. 8 Injector needle after durability test

연료라인 및 연료레일에 사용되는 고무류는 잔류물이나 황성분이 비교적 적었으나, Fig. 6처럼 연료라인의 고무류에서의 질소화합물이 다량 발견되었다. 질소성분 또한 고분자 물질과의 반응으로 연료시스템 상의 퇴적물 생성에 큰 영향을 미치는 성분이며, 주로 PE(폴리에틸렌)/PP(폴리프로필렌) 재질의 첨가제에서 기인된다.

3.3 LPG인젝터 특성변화

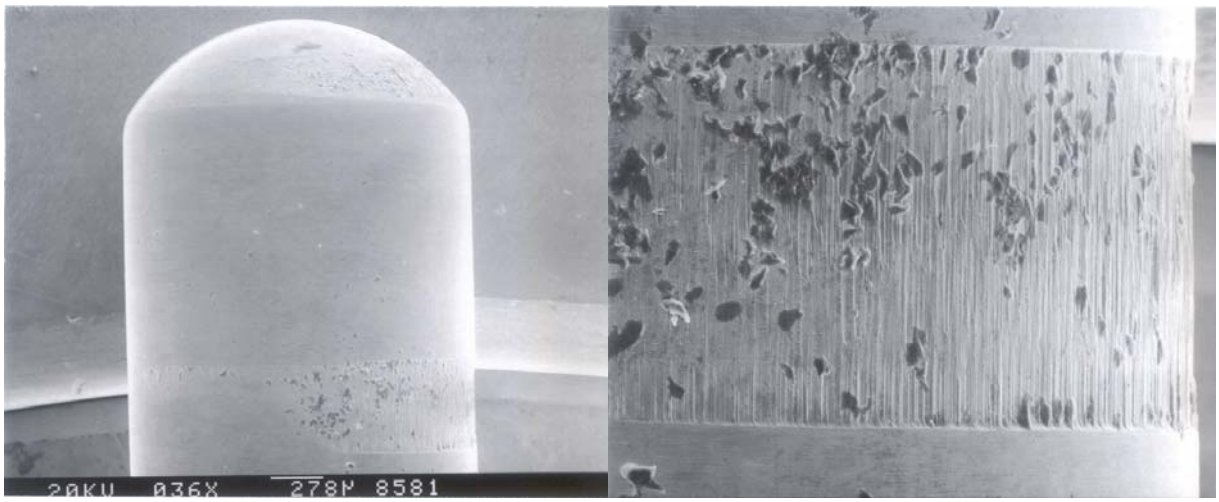
이렇게 LPG연료와 연료시스템을 구성하는 고무류의 반응으로 생성된 잔류물은 연료와 같이 이동하며, 연료 상변화가 일어나는 구간, Fig. 7의 연료가 분사되는 분사기 끝단에서 주로 기화하지 못하고 퇴적하게 된다. 또한 퇴적된 잔류물은 분사기내에서 장기간의 접촉으로 고착화하게 되며, 이는 분사기 니들의 편심현상이나 기밀성 유지, 아이싱 형성 등에 문제점을 보이게 되어 연료분사기의 성능을 악화시킬 수 있다.[7] 이를 알아보기 위하여 양산용 LPLi인젝터를 이용해서 벤치 내구실험장치를 구성하여 반복 분사실험을 실시하였고, 1000시간의 내구실험 후 누설이 많이 발생하는 인젝터를 분해하여 내부 기구물의 상태를 살펴보았다. Fig. 8에 분해된 인젝터의 기구물에 LPG연료 잔류물들이 많이 접촉해 있고, 니들 측면에 편마모가 일어난 모습이 나타나 있다. 즉, 인젝터에서 액상의 LPG연료가 분사되면서 기화가 일어나고, 이곳에 황이나 질소화합물을 많이 포함하는 고분자의 잔류물이 증발하지 못하고 쌓이게 되는 현상이 발생하며, 이러한 현상이 장기간 반복적으로 발생하면서 니들부가 한쪽으로 기울어져 편마모가 발생하는 것으로 판단된다.

이럴 경우, LPG인젝터가 니들이 닫힌 상화에서도 미세 열림이 발생하여 연료가 계속적으로 새어나오는 문제점이 발생하게 된다. Fig. 9에는 이렇게 기울어져 한쪽이 마모된 인젝터 니들을 SEM으로 촬영한 모습과 이를 확대 촬영한 모습을 나타내었다.

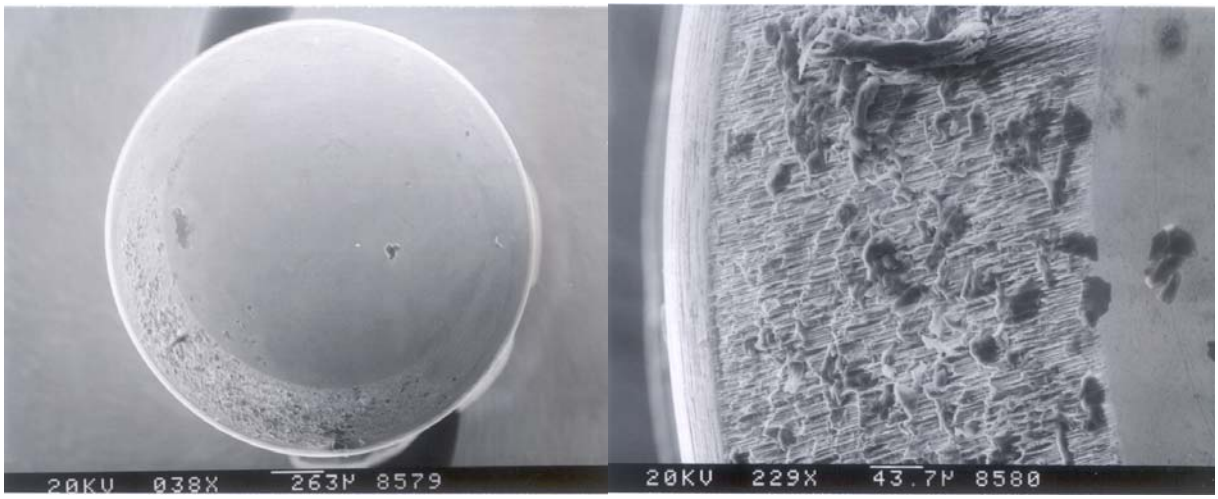
그러나 본 실험이 벤치리그를 이용하여 LPLi연료시스템을 구성하는 고무류와 LPG연료와의 장기간 접촉에 의한 반응성 실험이므로, 첫째, 자동차사와의 협력으로 실제로 운행 중인 차량에 대한 핵심부품 및 고무류에 대한 특성조사를 통하여 연료의 잔류물과의 상관관계를 밝히는 연구가 필요할 것으로 보인다. 둘째 과대 반응성 결과가 주로 LPLi 연료펌프를 둘러싼 고무류 커버에서 나타났으나 다른 고무류 구성품들도 반응성이 조금씩 있기 때문에, 일반적인 기화기 장착 LPG차량도 같은 문제가 될 수 있다. 물론 기화기 차량은 기화가 기화기 내에서 일어나기 때문에 이에 대한 정기적인 관리가 필요한 것으로 보인다.

4. 결 론

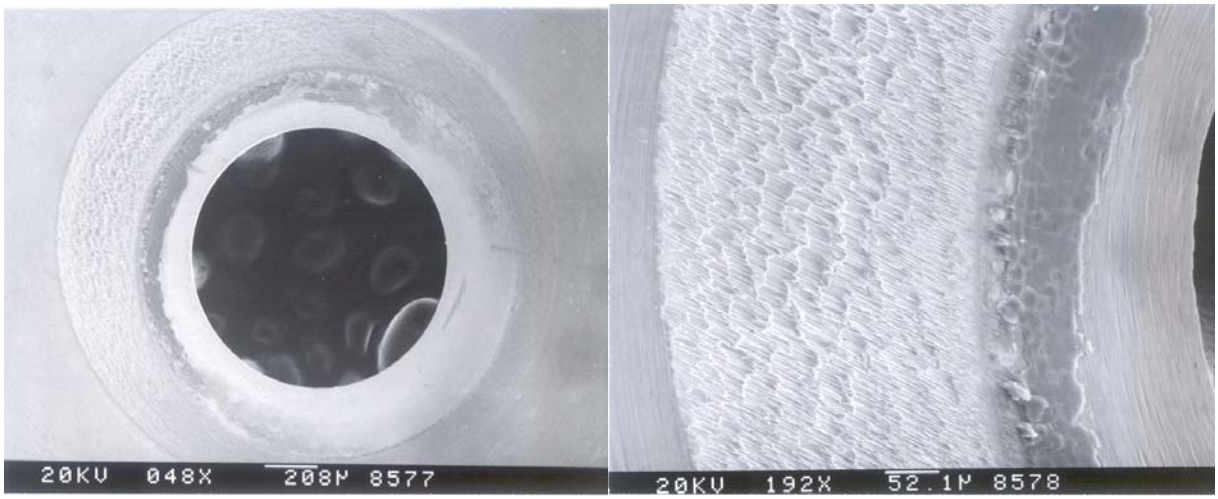
본 연구는 LPLi연료시스템을 구성하는 대표적인 고무류와 LPG연료와의 장기간 반응성 실험을 통하여 발생하는 LPG연료 잔류물의 원인 및 특성파악을 하고자 하였으며 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



(a) Side view of a neddle which is partially worn after durability test



(b) Top view of a neddle which is partially worn after durability test



(c) Top view of a nozzle which is partially worn after durability test

Fig. 9 Photographies of injector core parts (neddle, nozzle) from SEM after durability test

(1) LPG연료와의 장기간 접촉으로 인하여 LPLi 연료시스템을 구성하는 고무류에서 고무류 제조시, 첨가되는 성분들이 녹아나오는 것으로 확인되었으며, 현 양산 LPLi시스템 중에 연료펌프커버, 연료라인, 연료레일 등의 고무류를 반응시킨 결과 연료펌프커버 고무류에서 베이스 대비 10배 이상의 잔류물이 검출되었다.

(2) 연료시스템에 퇴적물을 생성케 하는 황 및 질소성분 분석실험에서도 연료펌프커버 고무에서 많은 양의 황성분 및 질소화합물이 검출되었다.

(3) 국내 LPG연료품질을 만족하는 올레핀 함량만으로도 잔류물 생성에 있어서 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 고무류에 대한 품질규제 강화가 시급한 것으로 판단된다.

(4) 잔류물은 LPLi연료시스템에 악영향을 미치며 특히 인젝터에는 심한 편마모 현상을 일으켜 누설현상을 증가시킬 수 있다.

(5) 이러한 잔류물에 대한 특성조사결과는 운행중인 LPLi 차량과의 연관성을 찾을 때 비로소 의미를 둘 수 있으므로, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 지경부 중소형 LPG상용차 개발사업 및 환경부 ECO_STAR사업의 지원 아래 이루어졌습니다.

참고문헌

(1) WORLD LP GAS ASSOCIATION, 2006, "Automotive LP Gas, Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow."

(2) Bas H., L. Conti and de Kok, P. 1995, "Propane the 'Clean' Fuel as the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles," *TNO-Paper VM9504.*

(3) Changup K., Daeyup L., Seungmook O., Kernyong K., Hoimyung C. and Kyoungdoug M., 2002, "Enhancing Performance and Combustion of an LPG MPI Engine for Heavy Duty Vehicles," *SAE 2002 International Congress and Exposition*, 2002-01-0449.

(4) Seungmook O., Seungyu K., Choongsik B., Changup K., Kernyong K. 2002, "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.

(5) Wooseok K., Jungcheol P., Simsoo P., Jaisuk Y., Jonghwa L., 2003, "A Study on the Development of Icing by Injection of LPG in the Liquid Phase Around Injector (I)," *Transaction of KSAE*, Vol. 11, No. 1, pp.87~94.

(6) Kernyong K., Daeyup L., Seungmook O., Changup K., 2001, "A Fundamental Study on a MPI LPG Engine for Heavy Duty Vehicles," *SAE* 2001-02-1958.

(7) Changup K., Seungmook O., Kernyong K., 2004, "Durability Properties of Liquid Phase LPG Injection System with Various Qualities of LPG Fuels," *KSAE* Vol.12, No.5.

(8) Changup K., Cheolwoong P., Kyonam C. and Kernyong K., 2007, "Reaction Characteristics of Rubbers and LPG fuels in LPLi Fuel Supply System," *Journal of ILASS-KOREA*, Vol.12, No.2.