

저점도 LPG연료 인젝터의 누설특성에 관한 연구

Leakage Characteristics of LPG injector
with Low Viscosity LPG Fuel김 창 업*, 박 철 응*, 오 승 목*, 강 건 용*
C. U. Kim, C. W. Park, S. M. Oh, K. Y. Kang

ABSTRACT

The use of clean gaseous fuels for the purpose of high efficiency and low emission in automotive engines has tendency to increase in order to meet the reinforcing emission regulations and to efficiently utilize limited natural resources. Automotive companies developed and commercialized a LPG liquid injection system, which is mounted on LPLi(Liquid Phase LPG Injection) engines and vehicles based on this research trend. This research examines the biggest problem in LPLi engine, that is, the leakage characteristics of low viscosity LPG fuel according to the injector design variables. This study is also aimed to improve the performance of fuel-leakage in LPLi engine through the addition of a lubrication improver in HFRR(High Frequency Reciprocating Rig) facility. The needle displacement and the spring displacement of an LPLi injector are found to be already optimized. The possibility of a maximum of 70% leakage reduction compared to a conventional case, is verified when 1000ppm of a lubrication improvement material is added and 40% increase of a injector spring constant (K) is applied.

주요기술용어 : LPLi (Liquid phase LPG injection, LPG액상분사방식), Leakage(누설), Low viscosity fuel (저점도 연료), Lubricity improver(윤활성 향상제), HFRR(High frequency Reciprocating rig, 마찰계수 측정기)

1. 서 론

최근 강화되는 배기가스 규제 및 천연자원의 효율적인 사용을 위하여 대체연료 사용에 대한 관심과 연구가 활발하게 진행되고 있으며 이에 따라 차량용 엔진에서는 고효율 및 저공해성을 목표로 하는 청정 가스연료의 사용 또한 증가하는 추세이다. 이와 같은 청정가스연료 중의 하나인 LPG의 경우, 지금까지 기화기 방식의 연료시스템을 사용하고 있어 연료공급의 정확도가 떨어져 아직까지 청정한 연료로서 제 역할을 다하지 못하고 있는 실정이었다. 이에 선진 외국에서는 1994년대부터 LPG의 정확한 공급과 LPG엔진의 문제점인 냉시동성, 출력부족을 해결할 수 있는 LPG액상분사방식(liquid phase LPG injection,

LPLi)을 개발하여 실용화하였다.⁽¹⁾

우리나라의 연구기관 및 자동차 제작사에서 이 같은 세계적인 연구동향과 점차 강화되는 LPG차량의 배기규제에 대응하기 위하여 최근 LPG액상분사방식 차량연구에 뛰어 들었으며^(2,3,4), 2003년부터 자동차제작사의 상용화가 이루어졌다. 기존의 LPG차량의 연료공급방식인 믹서(mixer)시스템에서는 LP탱크 내에 포화증기압 상태로 존재하는 연료가 자체 압력에 의해 별도의 가압장치가 없이 기화기로 공급되었으나 LPG액상분사 방식의 경우에는 연료탱크 내에 연료펌프를 두어서 LPG의 포화증기압보다 높은 압력으로 인젝터까지 LPG 액상연료를 공급한다. 이러한 높은 압력의 유지는 연료공급

* 한국기계연구원, 친환경엔진연구센터

라인의 형상, 엔진에서 발생하는 열, 그리고 연료분사에 의한 압력강하로 인하여 연료공급라인 중에 상변화가 일어나 기상연료가 발생하는 문제를 해결하기 위한 것으로, LPG를 액상으로 정확하게 인젝터에서 분사할 수 있도록 하는 안정적인 연료공급방법이다.^(5,6)

이러한 LPG액상분사방식의 문제점으로 지적되는 것이 경유대비 1/10 수준의 저점도(약 0.3cSt)연료를 고압(약 20bar 이하) 상태에서 다루기 때문에 발생하는 연료펌프의 가압이 원활히 이루어지지 않는 문제나 연료 인젝터에서 연료가 누설되는 문제 등이 발생할 수 있다는 것이다. 물론 연료펌프의 경우, 전용 다이어프램방식의 펌프에서는 이러한 저점도 문제가 발생하지 않았다. 그러나 연료 인젝터에서는 저점도 상황에서 전용 인젝터로 사용되고 있는 S사의 인젝터에서 누설이 발생하였으며(fig.1), 이는 자동차의 배기가스 발생량에 큰 영향을 미치기 되었다. 또한 2007년부터 LPG자동차의 배기가스 규제가 ULEV규제가 적용되게 됨에 따라 인젝터의 연료누설은 매우 중요한 화두가 되고 있다.

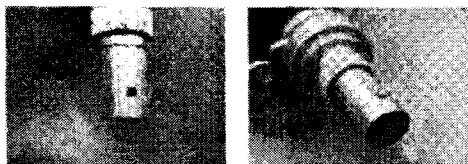


Fig. 1 Leakage phenomenon of injector

LPLi 인젝터의 주요 누설원인으로는 LPG연료의 낮은 점도와 인젝터의 설계적인 측면에서 니들의 상하운동에 의한 노즐부와와의 접촉이상,

인젝터 내부부분의 비 최적화 등을 생각해 볼 수 있는데, 본 연구에서는 이 같은 연료누설의 특성을 실험을 통해 파악할 수 있도록 LPLi 인젝터의 부품을 그대로 이용한 인젝터 기능을 하는 평가장치를 제작하여 가장 최적화된 설계변수를 제시할 수 있도록 하였으며, 또한 저점도 연료에 사용되는 윤활성 향상제(lubricity improver)를 도입하여 점도특성변화를 측정하는 HFRR(high frequency reciprocating rig)기기를 이용하여 살펴보았다. 이러한 연료누설에 대한 기본특성결과는 연료 인젝터의 누설현상 해결에 대한 기초 자료로써 활용될 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연료누설 실험평가장치

LPG인젝터의 설계변수(니들리프트, 스프링 리프트, 스프링강도)에 대한 최적치를 밝히기 위하여 전용 인젝터를 분해하여 내부구조를 파악하였고 이들 바탕으로 설계변수들을 조절할 수 있는 인젝터형 평가장치를 제작하였다.

인젝터의 내부구조를 살펴보면 fig.2와 같이, 인젝터 니들 위쪽의 스프링의 힘으로 니들과 노즐을 밀착시켜 니들끝단과 노즐부의 선접촉을 통해 인젝터의 기밀을 유지하고 있다. 연료분사는 자화된 코일이 니들을 위쪽으로 움직여 노즐을 통해 연료를 분사한다. 이때 니들이 편심되어 노즐부위에 안착될 경우 노즐부와 틈이 생겨 연료가 누설될 수 있기 때문에 이러한 노즐편심현상을 방지하기 위해 니들 홀더를 장착하고 있다.

평가기의 구성은 fig.3과 같이 실제 인젝터와 동일한 기능을 갖도록 설계되었다. 실제

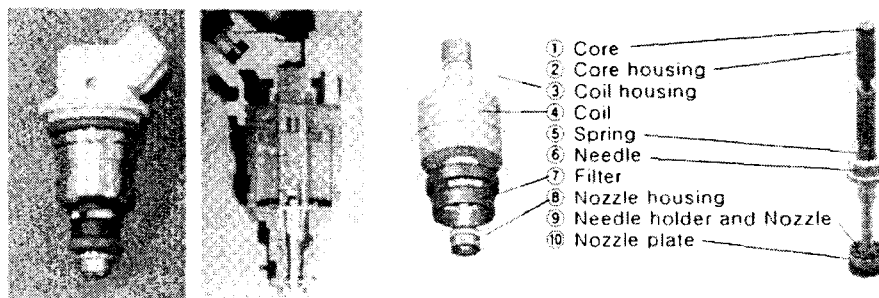


Fig. 2 Section Diagram of LPG injector

LPG인젝터는 내부 부품의 교체나 변형을 위해서는 재조립이 불가능한 완전 분해를 해야 하며 이를 다시 원래대로 조립이 불가능하도록 되어 있다. 따라서 평가기에서는 니들, 노즐 및 스프링 등의 주요 기능부품에 대한 변수실험을 진행할 수 있도록 이러한 품목들의 교환이 가능하도록 설계되었고 이를 위해 니들, 노즐 홀더, 노즐, 스프링, 코일, O-링, 인젝터 필터는 기존부품을 사용하고 나머지 부품은 자체 제작하였다(fig.4, 5).

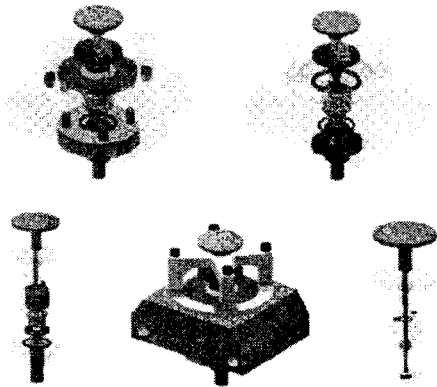


Fig. 3 Schematic dia. of leakage test rig

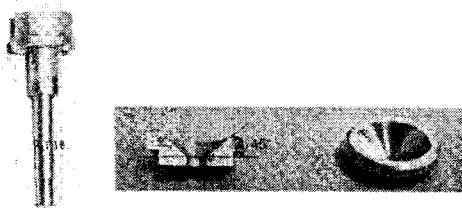


Fig. 4 Needle and nozzle of test rig

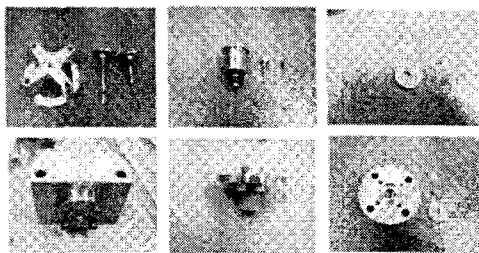


Fig. 5 Core parts of leakage test rig

실험변수설정을 위해 fig.6과 같이 인젝터의 내부를 절단하여 니들 lift와 스프링 lift를 측정하였으며 이때 초기값은 니들 lift는 약 0.1mm, 스프링 lift는 1mm였다. 이 값을 기준으로 니들 lift와 스프링 lift를 변경하면서 인젝터 누설과의 관계를 실험하였다. 또한 기존 부품 중 스프링을 초기 탄성계수(0.25kg/mm)와 다른 탄성계수의 부품을 제작하여(0.15, 0.4kg/mm) 스프링 탄성력이 기밀성에 미치는 영향을 분석하였으며, 연료의 유허성을 향상시키는 유허성 향상제를 3 종류 구하여 이를 첨가하면서 연료의 누설량도 측정하였다. 표 1에는 실험에 사용된 유허성 향상제의 특성을 나타내었는데, 상용 첨가제이기 때문에 제작사에서 제품사양의 제공을 거부했기 때문에 자세한 자료는 얻을 수 없었다.

실험평가에 사용된 LPG연료는 프로판 60%, 부탄 40%의 성분을 가졌으며 후방공급압력은 누설량을 명확히 확인하기 위하여 실제조건보다 조금 높은 12기압을 유지하였다. 연료누설량은 가스 버블메터(gas bubble meter)를 사용하여 측정하였다.

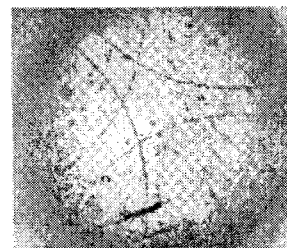
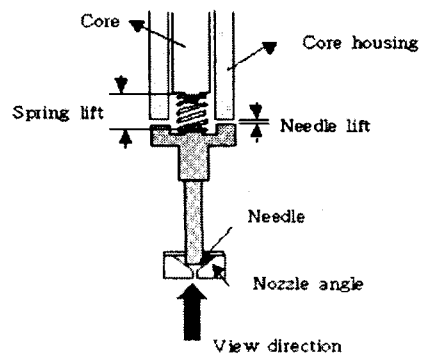


Fig. 6 Inside structure of LPLi injector and photography of needle

표 1. Specification of lubricity improver

제조사	윤활성 향상제	점도 (cSt)
Ethyl	H4140	29.40
Lubrizol	LZ539N	36.59
Infinium	R-665	184.48

2.2 HFRR기기 평가장치

HFRR기기는 일반적으로 연료의 윤활성 (lubricity)을 측정하는 기기이지만 장비가 open System이므로 원상태의 장비로는 상온에서 가스 상태인 LPG의 윤활성 측정은 불가능하다. 따라서 fig.7과 같이 HFRR 장비 전체가 들어가는 가압챔버를 제작하여 내부를 6기압으로 가압한 후 측정하였다. 실험방법은 HFRR기기의 표준실험조건인 ASTM D 6079(Standard test method for evaluating of diesel fuel by-HFRR)를 따랐다. HFRR기기의 작동조건은 Load/200g, 50Hz, Stroke/1,000micron, 75min 이었다. 이러한 실험한 결과로 fig. 8과 같은 가로, 세로 굽힘 정도를 얻을 수 있으며 이를 평균하여 대표값(mean wear scar diameter, MWSD)으로 하였다.⁽⁷⁾ 이를 앞서 설명한 윤활성 향상제의 첨가(500, 1000, 1500ppm)에 대해서 측정을 하였다.

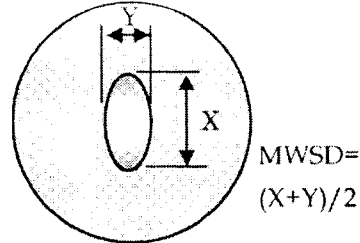


Fig. 8 Size of measured mean wear scar diameter(MWSD)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스프링, 니들 lift 변화실험

니들 lift에 따른 누설량의 변화와 스프링 lift에 따른 누설량의 변화를 측정하였다. 누설량 측정결과(fig.9)에서 초기의 누설량이 많은 이유는 인젝터에서 연료를 분사한 후에 누설량을 측정하기 때문에 측정장치에 묻은 LPG연료가 급속히 기화하면서 나오기 때문이다. 따라서 일정시간이 지나고 나면 안정된 값을 보여주게 된다. 따라서 이후의 모든 누설량 측정은 일정시간이 경과된 후에 측정된 값들이다.

실험결과 Fig.9, 10에서 보듯이, 니들 lift에 따른 누설량의 변화는 거의 없는 반면에 스프링 lift의 변화에 따른 누설량은 큰 차이를 보였다. 스프링 lift가 0.5mm일때, 약 0.3cc/min 정도 누설되는 것에서 스프링 lift를 2.5mm로 변

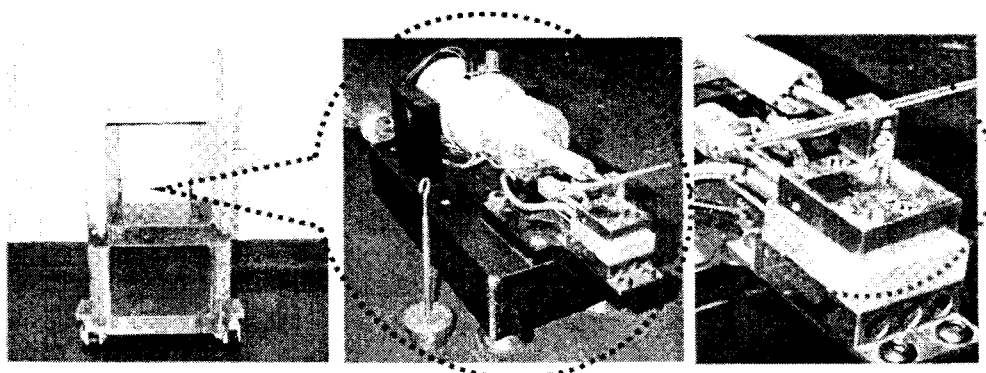


Fig. 7 Photography of HFRR rig and compressed chamber

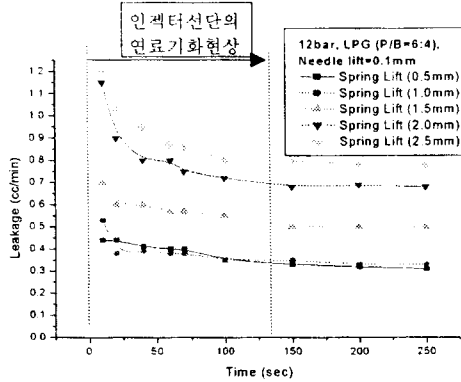


Fig. 9 Leakage amount with various spring Lift in LPLi injector

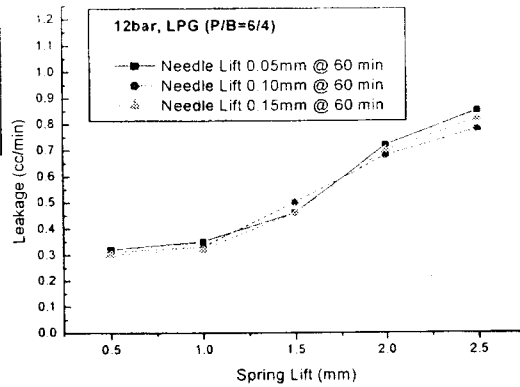


Fig. 10 Leakage amount with various needle lift and spring Lift in LPLi injector

경 시 누설량은 약 0.8cc/min으로 약 2.7배 정도의 차이를 나타내었다. 이는 스프링 lift가 니들의 노즐압착에 영향을 주기 때문에 발생하는 현상으로 초기의 스프링 lift가 1.0mm인 점을 감안하면 인젝터의 스프링 및 니들 lift는 최적화 되어 있음을 알 수 있었다.

3.2 윤활성 향상제 첨가실험

LPG연료의 낮은 점도로 인한 누설보완을 위하여 LPG연료에 윤활성 향상제를 첨가하여 기밀성의 향상여부를 측정하였다. 실험에 사용한 윤활성 향상제는 표 1에서 언급된 종류 중 두 가지로 Ethyl사의 Hitec 4140과 Lubrizol사의 539ST를 사용하였다. 이들은 일반적으로 ULSD(Ultra Low Sulfur Diesel, 저황함유 경유), DME(De MethylEther) 및 LPG연료 같은 저점도 연료의 윤활성을 향상시키기 위해서 사용되는 것으로서 점도는 약 30~36Cst 정도로서 상용화되어 판매되고 있다. 윤활성 향상제는 500, 1000, 5000ppm을 첨가하여 각각의 경우에 대하여 누설량의 변화를 측정하였다.

Fig.11에서 윤활성 향상제를 1000ppm 첨가한 경우 Hitec 4140의 경우 윤활성 향상제를 추가하지 않은 경우에 대비해서 약 35~40% 정도 기밀성이 향상되었으며, Lubrizol 539ST의 경우 15~23% 정도 기밀성이 향상되었다. Hitec과 Lubrizol의 비교는 fig.12에 나타나 있다. 윤활성 향상제가 1000ppm과 5000ppm에서

동일한 누설량을 나타내었으며 이를 통해 윤활성 첨가제의 최대 효과는 1000ppm정도 일 때 인 것으로 분석되었다.

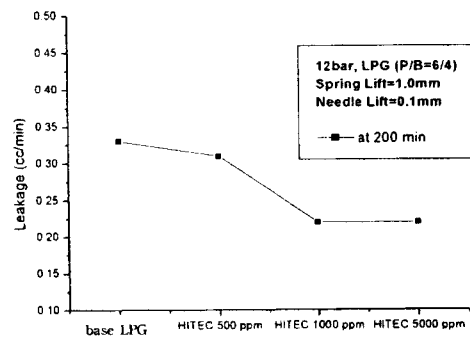


Fig. 11 Leakage amount with various additive of lubricity improver

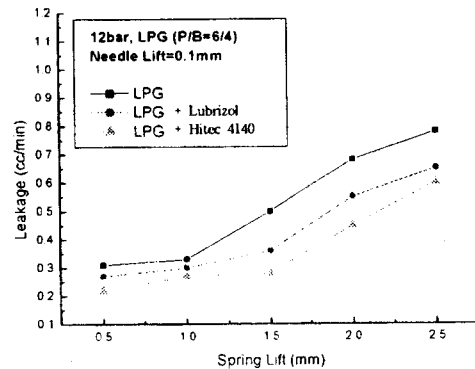


Fig. 12 Leakage amount with various spring Lift and lubricity improver

Fig.12의 그래프는 두 가지 윤활성 향상제를 첨가하고 스프링 lift를 0.5mm~2.5mm까지 변경하면서 누설량을 측정한 결과로서, 윤활성 향상제의 첨가에 따른 스프링 lift의 최적값도 앞선 실험과 동일한 0.5~1.0mm 부근으로 확인되었다.

3.3 스프링 계수변화실험

연료누설의 원인중 하나인 인젝터의 스프링의 힘에 의한 특성실험을 위하여 기존의 스프링 상수(K)값을 변경하여 여러 가지로 제작하여 누설량을 측정하였다. 기존 스프링 상수는 0.25kg/mm였으며 제작한 스프링은 상수값을 40%정도 낮은 스프링(K=0.15kg/mm)과 40% 높은 스프링(K=0.4kg/mm) 두 개를 제작하여 실험을 하였다.

Fig.13의 실험결과에서 스프링 상수값이 기존 스프링 대비 40% 낮을 경우 25% 정도의 누설량 증가를 나타냈으며 스프링 상수값이 40%정도 높은 경우 60% 정도의 누설량 감소를 나타내었다. 위와 같은 인젝터의 기밀성 측

성에 관한 실험결과에서 인젝터의 누설 변위와 스프링 변위는 인젝터 구조상 최적화 되어 있는 것으로 판단되며, LPG 액상분사방식의 LPLI 시스템의 전용 인젝터의 기밀성 향상을 위해서는 LPG연료에 윤활성 향상제를 첨가하고, 인젝터 스프링 K 값을 변경한다면 기존의 경우보다 최대 70% 정도의 누설량 저감을 보일 수 있을 것으로 결론을 얻었다.

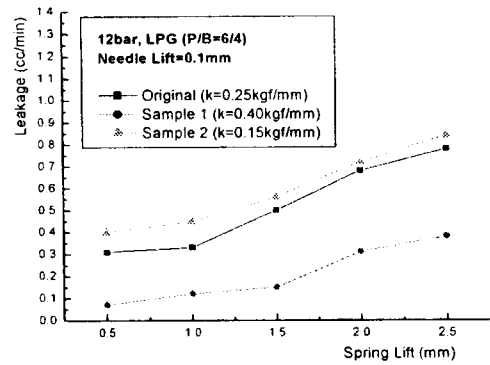
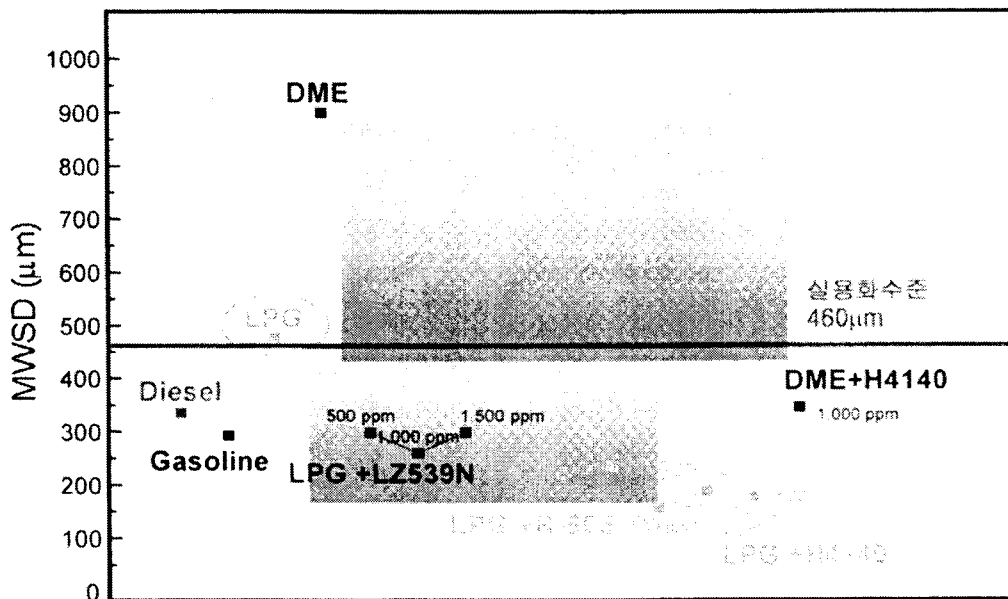


Fig. 13 Leakage amount with various spring forces in LPLi injector



Comparison of lubricity values with various fuel and lubricity improver

Fig. 14 Results of HFRR test rig with various additives of lubricity improver

3.4 연료 유효성 향상제 첨가실험

HFRR기기를 이용한 유효성 정도를 측정된 결과, fig.14에 나타나 있듯이, 첨가제별로는 Ethyl사의 H4140이 가장 우수하였으며 유효성 첨가제 사용 후 기존 LPG 대비 유효성이 3배 정도 향상되었음을 확인할 수 있다. 추가적으로 대체연료로 관심을 갖는 DME의 경우도 저점도 연료로서 많은 문제점을 보여주기 때문에 이에 대한 실험을 수행하였다.

초기 DME의 값은 $900\mu\text{m}$ 이며 H4140을 1,000ppm 주입하면 약 $345\mu\text{m}$ 로 2.6배의 유효성 향상 효과가 있었다. LPG연료는 적당한 양의 유효성 첨가제 사용하면, 기존 가솔린, 디젤보다 유효성이 좋은 것으로 나타났다. 첨가제 제조사에서의 추천 양은 약 1,000ppm 정도였으며, 실험결과도 1,500ppm 주입결과가 1,000ppm에 비해 우수하지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 LPLi차량의 전용 인젝터로 사용되는 S사의 인젝터의 연료누설특성을 알아보기 위한 평가실험을 실시하여 그 특성을 알아내고 가장 최적화된 인젝터의 설계변수를 제시하고자 하였고 또한 저점도 LPG연료에 사용되는 유효성 향상제를 도입하여 HFRR기기를 이용하여 점도특성을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) LPLi 전용 인젝터의 연료누설량 특성실험에서 S사 인젝터 내부의 니들변위와 스프링 변위는 인젝터 구조상 최적화 되어 있는 것으로 판단된다. 즉, 니들 Lift에 따른 누설량의 변화는 거의 없는 반면에 스프링 lift의 변화에 따른 누설량은 큰 차이를 보였다. 스프링 lift가 0.5mm일때, 약 0.3cc/min 정도 누설되는 것에서 스프링 lift를 2.5mm로 변경 시 누설량은 약 0.8cc/min으로 약 2.7배 정도의 차이를 나타내었다. 초기의 스프링 lift가 1.0mm인 점을 감안하면 인젝터의 스프링 및 니들 lift는 최적화 되어 있음을 알 수 있었다.

2) LPLi 인젝터의 스프링 값과 연료내의 유효

성 향상제의 첨가는 기밀성능에 영향을 주는 것으로 나타났으며 특히, 유효성 향상제(점도 30~36Cst)의 1000ppm 첨가와 인젝터 스프링 상수 K값의 40% 정도 증가는 기존 경우보다 최대 70% 정도의 누설량 저감을 보일 수 있는 가능성을 확인하였다.

3) LPG연료는 1000ppm 정도의 유효성 향상제(점도 30~36Cst)를 첨가하면, 기존 가솔린, 디젤보다 유효성이 좋은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과기부 NRL 및 환경부 ECO_STAR사업의 지원 아래 이루어 졌습니다. 이에 저자일동은 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 1) M. van der Steen "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations", TNO-paper VM9608, 1996.
- 2) Keryong Kang, Daeyup Lee, Seungmook Oh and Changup Kim, "Performance of an Liquid Phase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicles", SAE 2001-02-1958, 2001.
- 3) Keryong Kang, Daeyup Lee, Seungmook Oh and Changup 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) Changup Kim, Daeyup Lee, Seungmook Oh, Keryong Kang, Hoimyoung Choi and Kyoungdoug 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) Seungmook Ohm Seungyu Kim, Choongsik Bae, Changup Kim, Keryong 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)". Transaction of Korea Society of Automotive Engineers, Vol.9, No.4. 2001.
- 7) K. Sugiyama, M. Kajiwara, M. Fukumoto, M. Mori, S. Goto and T. Watanabe. "Lubricity of Liquified Gas Assessment of Multi-Pressure, Temperature High-Frequency Reciprocating Rig (MPT-HFRR)-DME Fuel for Diesel. 2004-01-1865. SAE. 2004