

LP가스연료 액상공급시스템 특성연구

An investigation of LPG fuel supply method for Liquid phase LPG injection system

김창업*, 오승묵*, 최수진*, 강건용*
C. U. Kim, S. M. Oh, S. J. Choi, K. Y. Kang

ABSTRACT

An experimental studies of conventional gasoline fuel pump were carried out to obtain fundamental data for liquid phase LPG injection(LPLi) system. A regenerative type and a roller-vane type of pumps were investigated in various operational condition. The experiments were performed to obtain flow rate of LPG fuel as a function of pressure differences and temperatures.

The regenerative pump had too low flow rate at some experimental conditions to use this pump system for LPLi fuel supply system. On the other hand, the roller-vane type pump can be applied to the system only if its check valve is modified. Cavitation might occur in this system which can result in system noise, flow rate variation, and pump durability problem. To solve these problems the system is needed to increase NPSH_r(required net positive suction head).

주요기술용어 : Liquid phase LPG injection(LPG 액상분사방식), Regenerative pump(재생펌프), Roller-vane pump(롤러베인 펌프), Cavitation(캐비테이션), NPSH_r(필요흡입수두)

1. 서 론

최근 강화되는 배기가스 규제 및 천연자원의 효율적인 사용을 위하여 대체연료 사용에 대한 관심과 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이에 따라 차량용 엔진에서는 저연비 및 저공해성을 목표로 하는 청정 가스연료의 사용 또한 증가하는 추세이다. 이와 같은 청정 가스연료 중의 하나인 LP가스의 경우, 지금까지 기화기 방식의 연료시스템을 사용하고 있어 연료공급의 정확도가 떨어져 아직까지 청정한 연료로서 제 역할을 다하지 못하고 있는 실정이었다. 이에 선진 외국에서는 LP가스의 정확한 공급과 LP가스엔진의 문제점인 냉시동성, 출력부족을 해결할 수 있는 LP가스 액상분사방식을 개발하여 실용화하였다.

우리나라의 자동차 제작사에서도 이 같은 세계적인 연구동향과 점차 강화되는 LP가스 차량의 배기규제에 대응하기 위하여 최근 LPG 액상분사방식 차량연구에 뛰어들었으며, 마침내 2003년 상용화를 이루어 내었다.^{1,4)}

기존의 LP가스 차량용 연료공급방식인 믹서 시스템에서는 LP탱크 내에 포화증기압 상태로 존재하는 연료가 자체 압력에 의해 별도의 가압장치가 없이 기화기로 공급되었다. 그러나 LPG 액상분사 방식의 경우에는 연료탱크내에 연료펌프를 두어서 LP가스의 포화증기압보다 높은 압력으로 인젝터까지 LPG 액상연료를 공급한다. 이러한 높은 압력의 유지는 연료공급라인의 형상, 엔진에서 발생하는 열, 그리고 연료분사에 의한 압력강하로 인하여 연료공급라인 중에 상

* 한국기계연구원, LP가스엔진연구사업단

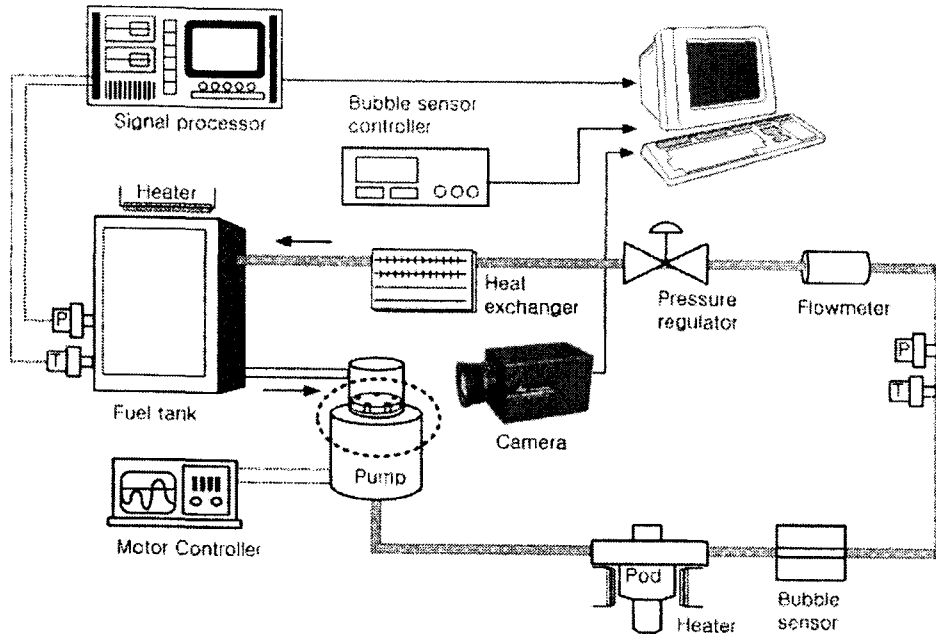


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

변화가 일어나 기상연료가 발생하는 문제를 해결하기 위한 것으로, LP가스를 액상으로 정확하게 인젝터에서 분사할 수 있도록 하는 안정적인 연료공급방법이다.

본 연구는 기존의 선진외국에서 개발된 연료공급 펌프시스템을 대체할 수 있는 국산 연료펌프의 개발을 위한 기초연구로서 기존의 가솔린용으로 사용되는 일반적인 펌프에 대한 액상 LP연료의 가압 및 펌핑 성능에 대한 연구를 진행하였다.

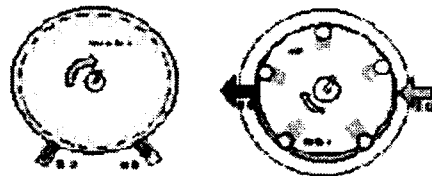
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 연료탱크에서 나온 연료는 연료펌프를 거치면서 고압화되어 연료라인 상에 설치된 인젝터, 유량계(flowmeter, Flowmetrics Co.)를 지나 압력조절기(pressure regulator)를 통해 다시 연료탱크로 돌아가는 시스템으로 구성되어져 있다. 연료펌프 전단과 후단에서 발생하는 변화를 살펴보기 위하여 연료펌프의 펌핑부를 가시화하

였다. 연료라인 상에서 열균형을 맞추기 위하여 연료 펌프의 모터에서 발생하는 열에 의해 시스템의 온도가 상승하는 것을 방지하기 위하여 압력조절기와 연료탱크 사이에 열교환기를 설치하여 시스템을 일정한 온도로 유지하도록 하였다.

Fig. 2에는 본 실험에 사용된 펌프의 구조를 나타내었다. 사용된 펌프는 재생형(regenerative type)과 롤러 베인형(roller-vane type)의 두 가지로 현재 자동차에 널리 사용되고 있는 것을 이용하였다.⁹⁾



(a) Regenerative pump (b) Roller-vane pump
Fig. 2 Schematic diagram of fuel pump

Fig. 2의 (a)에 나타낸 재생펌프는 모멘텀(momentum) 변환에 의해 비교적 낮은 회전수에서 높은 양정을 낼 수 있도록 설계되어 상용의 가솔린용 연료 펌프로 사용되고 있다. 또 Fig. 2

(b)의 롤러베인 펌프는 고유량, 고성능의 가솔린용 펌프나 커먼레일 디젤엔진의 전처리 펌프(pre pump)로서 사용되고 있다.

2.2 실험방법

Table 1에 실험조건을 나타내었다. 일반적으로 자동차용에 사용되는 연료펌프의 모터는 전압에 따라 회전수가 변화하는 특징을 가진다. 따라서 본 실험에서는 펌프의 성능을 측정하기 위하여 펌프에 공급되는 전압(voltage)을 8~14V까지 변화시켜가면서 그때의 펌프의 유량 특성을 조사하였다. 또한 일반 가솔린 엔진에서 사용되는 연료 조절기는 차압을 약 3기압 정도로 조절하지만, LP가스의 경우에는 연료라인 상에서 발생될 수 있는 기포를 없애기 위하여 연료탱크와 연료라인 사이에 약 5기압 정도의 차압을 가지도록 설계를 하고 있다. 따라서 본 실험에서는 연료탱크와 연료라인의 차압을 임의로 조절할 수 있는 압력조절기를 이용하여 연료라인상의 압력을 3~7기압으로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 또한 LP 가스 차량에서 연료탱크의 온도는 계절에 따라 온도편차가 크게 발생하며 연료의 물성치가 온도에 민감하기 때문에 온도에 따른 특성으로 시스템의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 이에 실험 온도조건을 두 가지로 변화시켰으며 탱크내의 압력 조건은 포화증기압 조건이다.

Table 1 Experimental conditions

Item	Pump type	
	Regenerative	Roller-vane
Voltage(V)	10~14	8~13
ΔP	3~6	3~7
Temp.($^{\circ}C$)	15, 40	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유량특성

LP가스는 점도(viscosity)와 포화증기압이 온도에 따라 급격하게 변화하는 특성을 나타낸다. 그림 3에 LP가스(프로판 60%, 부탄 40%)에 대한 점도를 온도의 변화에 따라 나타내었다.

일반적인 가솔린용 연료펌프의 LP가스에 대한

펌핑성능을 알아보기 위해 펌프의 종류에 따라 측정된 펌핑유량 결과를 그림 4와 5에 나타내었다. 그림의 세로축은 펌프의 유량을 나타내며, 가로축은 펌프에 투입되는 전원의 전압을 나타낸다. 그림 4는 가솔린용 펌프에 대한 결과로서 연료의 승압정도(ΔP)가 감소할수록, 펌프 작동용 전압이 증가할수록 유량값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 승압이 6기압 이상일 경우, 유량이 거의 나오지 않아서 데이터가 부족하였다. 그리고 LP가스를 사용할 수 있는 조건인 차압 5기압인 경우의 유량이 작동전압이 12V일 때 약 10(l/hr)이고 13V에서 약 30(l/hr)로 상당히 유량이 적어 실제 차량에 적용하기에는 곤란할 것으로 예상된다. 이렇게 유량이 적게 나오는 이유는 펌프의 구조상 고압의 승압이 어려우며, 펌프의 입구부에서 과도하게 발생되는 캐비테이션(cavitation) 현상 때문으로 보인다. 이로 인하여 유량 변동이 심하며 어느 순간 펌핑이 정지되는 경우도 확인할 수 있었다.

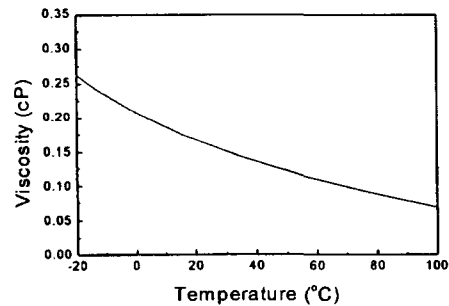


Fig. 3 Calculated viscosity of LP gas fuel (Propane 60%, Butane 40%)

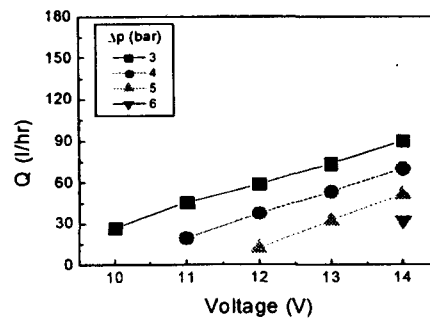


Fig. 4 Flow rate characteristics of regenerative fuel pump

그림 5는 롤러 베인형 펌프에 대한 결과를 보여 주고 있다. 이 형태의 펌프는 펌프의 체크밸브가 펌프 앞단에 설치되어 양정이 상승하면 체크밸브가 열려 다시 연료가 역류하게 됨으로써 정확한 차압에 따른 유량의 측정이 불가능하였다. 이에 본 연구에서는 체크밸브를 막고 실험을 수행하였다. 롤러베인 펌프의 실험결과는 재생펌프와 유사한 결과를 보여주고 있지만, 재생펌프에 비해 큰 승압조건에서도 연료펌프의 작동이 이루어 졌으며, 비교적 낮은 작동전압에서도 많은 유량이 나오고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 정상 작동조건인 12V에서 승압 5기압의 경우, 약 100(l/hr)의 유량이 나오고 있어 중소형 엔진에 적용 가능한 유량값을 내는 것을 확인하였다. 그러나 재생펌프와 마찬가지로 작동전압을 낮추거나 펌핑 차압이 6기압 이상으로 큰 경우에는 캐비테이션이 연료펌프 입구부에서 발생하며 펌핑 유량이 현저하게 줄어드는 경향은 동일하게 나타났다.

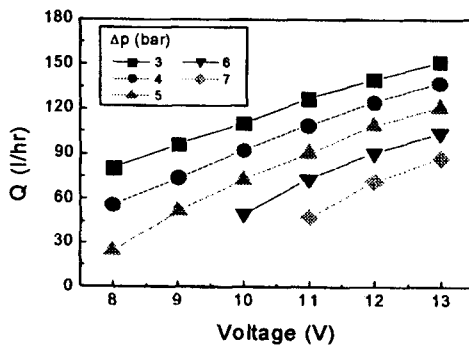


Fig. 5 Flow rate characteristics of roller-vane fuel pump

3.2 펌프 회전수에 따른 특성

앞 절에서 구한 롤러 베인형 펌프의 전압과 차압에 대한 펌프 유량값을 기초로 하여 펌프 회전수와 유량과의 상관관계를 알아보기 위해 그림 6에 무부하 상태에서의 펌프의 회전수를 측정하여 나타내었다. 모터의 특성상 전압 제어에 의해 회전수가 결정되므로 전압이 상승함에 따라 회전수가 비례하여 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

위와 같은 특성을 지닌 롤러 베인형의 펌프는 용적식(positive displacement) 펌프의 한 종류로 펌프의 유량 특성은 형상 설계 치수와 펌프 회전수의 함수로 아래의 식 (1)과 같이 펌프 1회전당 이론적인 토출량으로 나타낼 수 있다^{6,7)}.

$$V_u = 2e \cdot b \cdot (\pi \cdot D_m - z \cdot s) \quad (1)$$

여기서, V_u 는 1회전당 토출량, e 는 편심률, b 는 로터의 두께, D_m 는 평균지름, s 는 베인의 두께, 그리고 z 는 베인의 수이다.

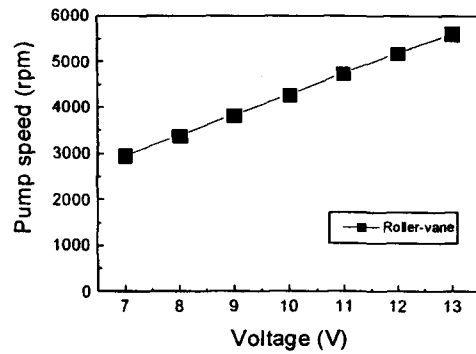


Fig. 6 Pump motor speed of Roller-vane fuel pump at unloaded condition

그러나 실제로 펌프가 작동될 때에는 차압에 따라 펌프에 걸리는 부하가 변동하므로, 이 부하 변동에 따른 펌프의 회전수와 유량 특성을 알아보기 위해 그림 7에 펌프에 대한 회전수와 유량과의 상관관계를 나타내었다. 점으로 표시된 값들이 실제 실험을 통해 구해진 값들이며 이를 이용하여 최소자승법으로 구한 값을 식으로 표시하였다. 또한 이론적인 유량은 식 (1)을 기준으로 하여 구해진 값을 선으로 표시하였다. 이론적으로 구한 유량은 펌프의 기하학적인 형상에 따른 내부손실(internal loss)이나 용적효율에 대한 고려가 없는 값이다. 그러나 실제로 펌프가 작동하는 경우에는 유체의 점도나 체적효율에 따라 이론적인 유량과는 차이가 나타날 것이 예상된다.

그림 7에 나타나 있듯이, 이론적인 유량과 실제 실험결과를 비교하여 보면 차이가 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 조금 더 자세히 알아보기 위하여 온도를 변화시키고 점도를 변화한 경우의 측정결과와 비교하여 살펴보면, 15°C

인 경우에 비해 40℃의 경우의 유량감소가 더 많이 되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 그림 3에 보인 바와 같이 온도가 증가함에 따라 점도가 감소하는 경향과 일치하는 결과이다. 즉, 점도가 감소하면 내부손실이 증가하여 유량이 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단할 수 있다. 또한 온도에 따른 유량의 변화에 대하여 최소자승법으로 구한 실험식의 표준편차를 살펴보면 40℃의 경우 15℃에 비해 1.5배 정도 더 큰 값을 나타내고 있는 것으로부터 점도가 떨어지면 펌프에서의 유량 변동이 증가하여 약간 불안정한 상태로 운전되는 것을 확인할 수 있다. 회전수에 따른 체적효율의 변화를 보기 위해 기운기를 살펴보면 변화가 거의 없는 것으로부터 펌프의 작동회전수 내에서는 체적효율의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

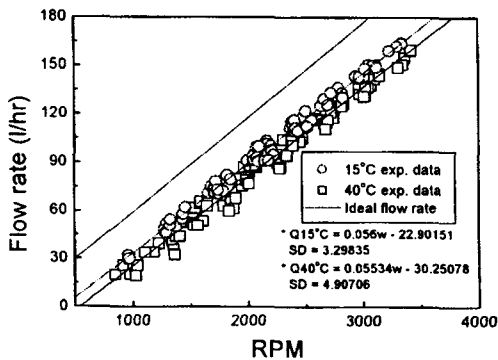


Fig. 7 Pump motor speed vs flow rate of Roller-vane fuel pump

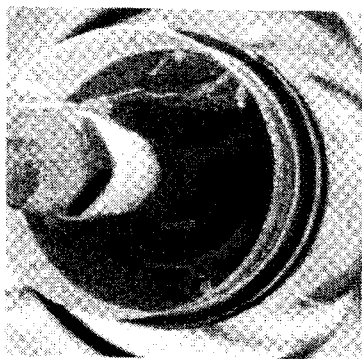


Fig. 8 Photography of Cavitation occurrence at entrance part of fuel pump

그림 8에 펌프전단에 발생하는 캐비테이션에 대한 사진을 나타내었다. 롤러 베인 펌프에서는 회전력과 형상변화에 의한 압축에 의해 작동유체가 가압되는데, 이 경우 펌프 전단에서는 압력이 감소하여 작동유체의 포화증기압보다 낮은 압력을 유지하게 되어 펌프전단에서 캐비테이션이 발생하는 것으로 보인다. 이러한 캐비테이션현상은 차량에서 연료펌프가 흔들릴 경우, 펌프내로 기포가 유입되어 소음이나 유량의 변화를 줄 뿐만 아니라 펌프의 내구성능에 까지 치명적인 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 이와 같은 캐비테이션을 없애기 위해서는 펌프전단에 필요흡입수두 ($NPSH_{re}$, required net positive suction head)를 증가시키는 방안 등을 적용하여 캐비테이션이 발생되지 않도록 하는 연구가 이루어져야 할 것이다⁸⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차용으로 사용되는 LP가스 액상공급시스템에 적용하기 위한 연료공급용 펌프시스템의 개발을 위한 기초연구로써 기존의 상용 가솔린용 연료펌프를 이용하여 LP가스와 같은 저점도의 특성을 가지는 연료에 대한 적용가능성에 대하여 실험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

일반적인 가솔린 재생형 펌프를 적용한 경우 펌프에서의 승압정도가 증가할수록 캐비테이션 등의 영향에 의해 유량값이 현저하게 낮아 펌프의 설계변경을 통하지 않고서는 적용이 불가능하였다.

롤러 베인형 연료펌프의 경우, 액상 LP가스 공급용 연료펌프로써 적용이 가능하였으나 내구성능까지 만족시키기 위해서는 펌프 전단부에서 발생하는 캐비테이션 현상을 해결하는 것이 필요할 것으로 보인다. 본 연구팀에서는 이에 대한 추가 연구를 진행 해 나갈 예정이다.

후 기

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. Bas 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.
2. Kernyong 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. Kernyong 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, Kernyong Kang, Hoimyung 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. 藤澤英也, 小林久徳, 新전자제어 가솔린 분사, Sankaido, 1993.
6. G. Vetter and R. Kozmiensky, "Pulsation and NPSHA in rotary positive displacement pumps", World Pumps, Volume 1999, Issue 389, February 1999, pp.37-42, Elsevier, 1999.
7. J. Bachmann, E. Ernst and H. Neubert, "An Extraordinary Rotor Pump", SAE paper No. 2000-01-0398, 2000.
8. 박한영, 김경엽, 펌프핸드북, 동명사, 2002.