



자동차용 LPG 펌프의 성능특성에 관한 연구

†박철웅 · 김창업 · 최교남

한국기계연구원

(2007년 9월 4일 접수, 2007년 11월 24일 채택)

A Study on the Performance Characteristics of a Fuel Pump in LPG Engine

†Cheolwoong Park · Changup Kim · Kyonam Choi

Korea Institute of Machinery and Materials

(Received September 4 2007, Accepted November 24 2007)

요 약

근래들어 강화되는 배출가스 규제에 대응하기 위한 대책으로 LPG 차량에 적용되고 있는 제3세대 LPG 연료공급방식인 LPLi(Liquid Phase LPG Injection)는 LPG 연료를 펌프를 이용해서 고압의 액상연료를 공급하는 것이 가장 핵심적인 기술이다. 그러나 LPG 연료의 경우 저점도, 저비점도의 물리적 특성을 갖는 가스연료로서 기존의 가솔린 또는 디젤용 펌프를 사용할 경우 성능 및 효율이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 가솔린 연료 펌프의 임펠러 방식을 응용 변형시켜서 LPG연료용으로 개발된 펌프를 이용하여 다양한 온도와 운전 조건에서 성능 및 효율을 파악하고, 펌프의 성능에 영향을 줄 수 있는 캐비테이션에 대하여 살펴보고자 한다.

Abstract – In recent years, the need for more fuel-efficient and lower-emission vehicles has driven the technical development of alternative fuels such as LPG(Liquefied Petroleum Gas) which is able to meet the limits of better emission levels without many modifications to current engine design. LPG has a high vapor pressure and lower viscosity and surface tension than diesel and gasoline fuels. These different fuel characteristics make it difficult to directly apply the conventional gasoline or diesel fuel pump. In this study, experiments are performed to get performance and efficiency of the fuel pump under different condition of the temperature, rotating speeds, and composition of fuel. The characteristics of fuel pump were affected by cavitation occurred from the variation of temperature and composition.

Key words : Liquid Phase LPG Injection, Fuel pump, Cavitation

I. 서 론

전 세계적으로 배출가스 규제가 더욱 엄격해짐에 따라 가솔린 및 디젤 차량과 더불어 LPG 차량도 이러한 배출가스 규제를 대응하기 위해 배출가스 저감 기술 개발이 절실히 요구되고 있다. 그러나 기존의 LPG 차량의 연료공급방식인 제2세대 믹서(mixer) 시스템은 LPG 탱크 내에 포화증기압상태로 존재하는 연료가 자체 압력에 의해 별도의 가압장치가 없이 기화기로 공급되며, 벤츨리에서 연료와 공기가 혼합되기 때문에 정밀한 혼합기의 공연비 형성이 어려워 차세대 배출가스규제

에 대한 대응이 불가능하고, 가스공급에 의한 저응답성, 출력감소, 겨울철 기화불량에 따른 시동성 저하 등의 문제점이 있다[1,2].

이에 대한 대책으로서 적용되고 있는 제3세대 LPG 연료공급방식인 LPLi(Liquid Phase LPG Injection) 시스템은 LPG 연료를 펌프를 이용해서 고압으로 승압하고 이를 액상상태에서 인젝터를 이용해서 분사하는 방식이므로, 믹서 시스템에 비해 출력 성능이 약 15% 정도 증가하여 동급 가솔린차량과 대동한 가속성능 및 출력을 내고 있으며, 연비도 약 7~9% 개선되는 것으로 평가되고 있다. LPG 가스의 특성상 낮은 배출가스로서 인해서 촉매에도 부하를 줄여줌으로써 촉매원가가 저감되는 이점이 있다[3].

†주저자:cwpark@kimm.re.kr

이러한 LPLi 방식은 원활한 LPG 액상연료공급을 위한 연료펌프가 가장 핵심적인 부품이지만, 현재까지의 모든 자동차제작사에서 채택한 방식이 선진 외국기술을 이용하고 있기 때문에 이에 대한 국산화 실용화 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 개발 중에 있는 임펠러 타입의 연료펌프를 이용하여 성능평가를 수행하여 일반적인 특성을 살펴보고, 운전 조건의 변화에 따른 성능 및 효율 변화의 원인을 파악하고자 하였다.

II. 이 론

LPLi 시스템의 연료펌프는 엔진요구량, 연료라인의 배압, LPG 성분에 따른 압력차이, 전압강하에 따른 펌프의 인가전압 강하, 온도에 따른 라인 압력상승 시 유량저하, 펌프의 RPM 상승으로 인한 유량상승 시의 압력상승 등의 여러 복합적인 요소가 고려되어야 한다[4]. Fig. 1에 일반적인 LPLi 시스템의 개략도를 나타내었다. 연료라인의 압력은 레귤레이터에 의해서 압력이 균일하게 제어되고, 액상의 연료 유지를 위하여 연료탱크 압력 대비 약 5 kg/cm² 이상의 압력이 유지된다. 연료 펌프는 강한 회전력을 얻기 위해서 DC 또는 BLDC 모터가 채용되며 공기와 차폐된 연료 속에서 동작된다. 펌프의 하단에는 임펠러(Impeller)가 장착되어 회전력으로 연료를 송출하며, 이 연료는 펌프 외부에 설치된 멀티밸브를 거쳐 연료라인으로 공급된다.

펌프의 운전에 있어서 성능특성에 영향을 주는 물리적 변수 중에서 정해진 펌프의 운전 시 성능을 제어하

는 변수는 입력동력(L)과 회전수(N), 유체의 밀도(ρ) 및 유체의 점성계수(μ)로서 펌프의 성능에 영향을 준다[5,6].

양정 또는 수두로 표시하는 펌프의 총 양정은 펌프의 입구와 출구에 있어서의 액체의 단위무게(1 kg)가 가지는 에너지의 차이이며 다음의 식 (1)과 같이 계산된다.

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} + \frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} + y \quad (1)$$

where P_d : 토출압력(kg/cm²)

P_s : 흡입압력(kg/cm²)

V_d : 토출유속(m/sec)

V_s : 흡입유속(m/sec)

γ : 액체의 비중량(kg/m³)

g : 중력가속도(m/sec²)

y : 토출 및 흡입압력 측정공의 수직높이(m)

펌프의 입구와 출구의 압력이 레귤레이터에 의해서 균일하게 제어되기 때문에 양정의 변화는 입력동력의 변화에 의한 액체의 속도차, 즉 유량의 변화로 볼 수 있다. 임펠러와 케이싱 사이의 유체 전단력에 의한 원판마찰손실, 작동유체의 누설에 의한 손실 등을 무시할 경우 입력동력과 회전수는 입력전원에 비례하고, 단일 유체의 경우 펌프 전후단의 밀도와 점성은 펌프의 성능 변화에 영향을 주지 않는다. 그러나 액상 LPG는 포화증기압이 낮기 때문에 펌프 입구부에서 캐비테이션(Cavitation: 공동현상)이 일어날 가능성이 높고, 펌프의

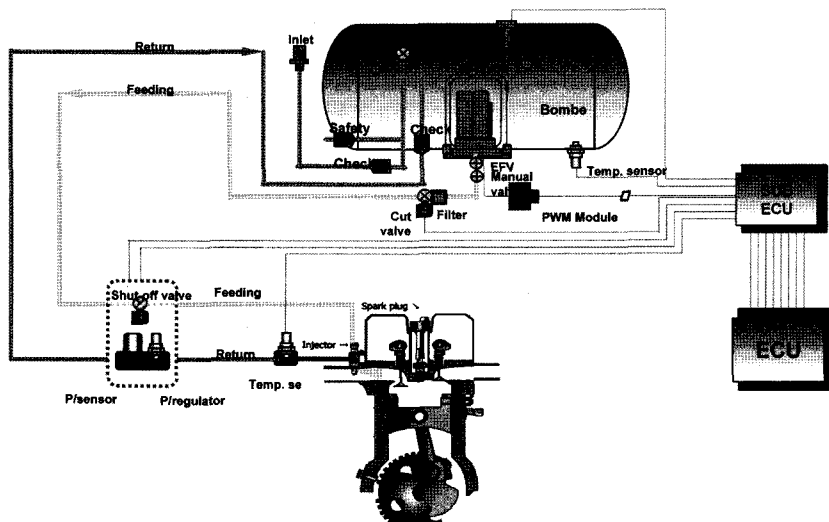


Fig. 1. Schematic diagram of LPLi fuel supply system.

토출량은 캐비테이션에 의해 상당히 저하될 수 있다[7].

펌프에서 발생하는 캐비테이션은 펌프의 효율을 심각하게 저해하는 요소 중의 하나이다. 액체가 유입되는 곳에서의 증기압이 액체의 증기압보다 낮아질 때 기포가 형성되고, 이러한 기포가 압력이 높아지는 곳에서 순간적으로 터지며 기포의 비어있던 공간사이로 액체가 빠른 속도로 유입되면서 충격력이 발생하게 된다. 즉, 캐비테이션의 발생은 어떤 임계값에서 액체의 절대압력의 감소를 야기하고 시스템에서의 압력 강하를 초래하는 극부적인 특성을 가진다. 펌프 중 캐비테이션 현상이 발생하면 성능 저하는 물론 진동, 소음을 수반하며 때로는 양수 불능 상태가 될 수도 있기 때문에 이를 억제할 수 있는 방법이 고려되어야 한다.

펌프 운전 시 캐비테이션 발생없이 펌프를 안전하게 운전되고 있는가를 나타내는 척도로 NPSH(Net Positive Suction Head: 유효흡입양정)이 사용되고 NPSH_{available}과 NPSH_{required} 값으로 분류할 수 있다. NPSH_{av}는 펌프의 설치조건(수면과 펌프와의 거리), 흡입관경 및 흡입배관의 길이, 이송액체의 온도 등, 펌프설치조건 및 배관 시스템에 의하여 결정되는 것으로서 다음 식 (2)와 같이 계산된다.

$$NPSH_{av} = \frac{P_i + P_s - P_v}{\gamma} + \frac{V_d^2}{2g} + y \quad (2)$$

where, P_i : 대기압력(kg/cm²)

P_s : 흡입압력(kg/cm²)

P_v : 액체의 증기압력(kg/cm²)

캐비테이션이 발생하지 않을 기본 조건은 $NPSH_{av} > NPSH_{re}$ 이나 일반적으로 여유를 고려하여 $NPSH_{av} > 1.3NPSH_{re}$ 의 조건을 만족하도록 한다.

일반적으로 $NPSH_{re}$ 는 펌프 제작자에 의해서 결정되는 흡입양정으로 동일사양 펌프라도 펌프 제작자 또는 설계자에 의해서 $NPSH_{re}$ 값이 결정된다. $NPSH_{re}$ 값을 구하는 방법은 실험에 의해서 $NPSH_{re}$ 값을 구하는 방법과 계산에 의해서 구하는 방법이 있으나, 본 연구에서는 토오마(Thoma)의 캐비테이션 계수를 이용한 계산을 통해 구한 값을 이용하였다. 토오마(Thoma)의 캐비테이션 계수, σ 는 펌프의 크기나 회전수와는 관계가 없고, 구조 즉 비속도, n_s 에 의해서 정해지는 무차원상수이다. 미국의 Hydraulic Institute의 발표에 의하면

$$\sigma = \frac{NPSH_{re}}{H} = \frac{78.8n_s^{4/3}}{10^6} \quad (3)$$

where, n_s : 비속도

로 쓸 수 있고 여기서 비속도, n_s 는

$$n_s = N \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (4)$$

where, N : 속도(RPM)

Q : 유량(m³/Hr)

이므로, 식 (3)과 식 (4)의 관계를 이용하면

$$NPSH_{re} = 7.88 \times 10^{-5} \times N^{4/3} \times Q^{2/3} \quad (5)$$

으로 표시된다. 위와 같이 구한 $NPSH_{re}$ 값을 이용해 $NPSH$ 의 특성도를 작도함으로써 캐비테이션 발생 한계를 알 수 있다[8].

펌프의 효율은 펌프의 입력인 모터동력에 대한 출력인 수동력의 비로서 다음과 같이 표시된다.

$$\eta = \eta_p \times \eta_m = \frac{WHP}{BHP} \times \frac{BHP}{EHP} = \frac{WHP}{EHP} \quad (6)$$

where, η_p : 펌프 효율

η_m : 모터 효율

WHP : 수동력

BHP : 축동력

EHP : 모터동력

여기서, 수동력과 모터동력은 각각 다음과 같은 식을 이용해 구할 수 있다.

$$EHP = \gamma QH \quad (7)$$

$$EHP = EI \quad (8)$$

where, E : 공급 전압(V)

I : 소비 전류(A)

III. 실험

엔진에서 LPG 펌프의 성능 및 캐비테이션 특성을 관찰하기 위해 실제 연료시스템을 사용하였다. Fig. 2의 실험장치 개략도와 같이 차량 내 연료펌프의 환경과 동일한 조건을 구현하기 위해 상용 연료탱크와 연료라인에 온도, 압력 센서 및 유량계를 장착하고, 고온 및 저온 실험이 가능한 대형 항온기를 제작하여 연료 공급 시스템 전체의 온도를 조절하였다. 1 m³의 내부 용적을 갖는 항온기는 최대온도 80°C까지 온도 조절이 가능하도록 제작·사용하였고, 연료 공급 시스템의 온도를 상

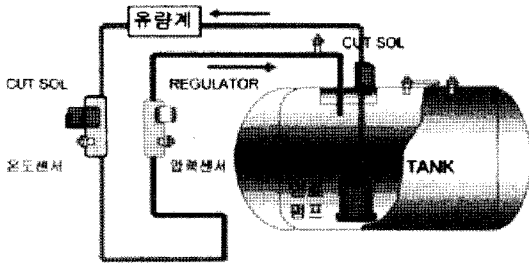


Fig. 2. Schematic diagram of rig setup for fuel pump.

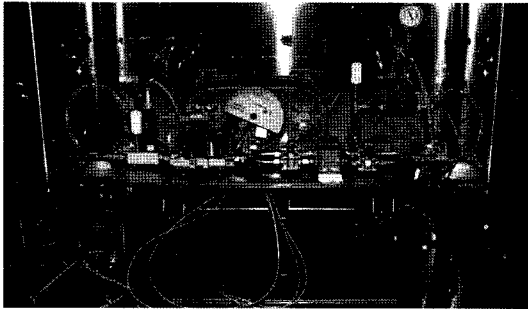


Fig. 3. Photographs of experimental rig.

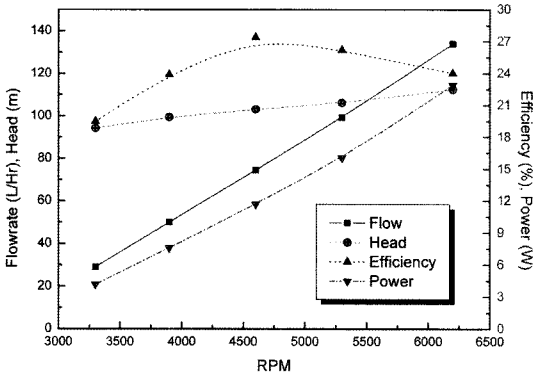


Fig. 4. Performance curves of pump at 25°C condition.

온 조건에서 60°C까지 10°C 간격으로 변화시키며 회전수에 따른 펌프의 성능 및 효율을 관찰하였다. 연료 펌프는 PWM(Pulse Width Modulation) 신호의 Duty 가변에 의한 회전수 조절이 가능한 펌프 전용 Driver에 의해 제어되었다. Fig. 3은 제작된 항온기와 연료 공급 시스템 및 제어장치의 모습을 나타낸다.

Fig. 4는 상온 조건인 25°C에서 연료펌프의 회전수를 3300 rpm으로부터 6200 rpm까지 5단계로 변화시키면서 측정된 유량과 양정, 동력 및 효율을 나타낸 그래프이다. 펌프의 성능은 연료의 종류에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 본 실험에서는 우리나라에서 동절기를 제외한 시기에 일반적으로 사용되는 Butane 100%의 연

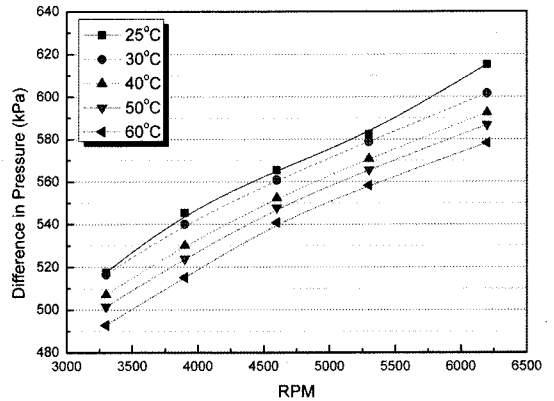


Fig. 5. Variation of difference in pressure between inlet and outlet.

료를 사용하여 성능시험을 실시하였다. LPLi 시스템에서 연료펌프의 경우, 일반적인 펌프 성능 시험과는 달리 액체의 흐름이 압력조정기에 의해서 제어된 후의 유량을 측정하기 때문에 유량에 대한 성능특성을 나타내기가 어렵고, 유량값 또한 실험변수인 회전수에 대한 결과치로 볼 수 있다. 유량은 회전수가 증가함에 따라 커지고, 효율의 경우 회전수에 대해서 설계점까지 증가하였다가 감소하는 일반적인 펌프와 동일한 특성을 보이고 있다. 최대효율은 27.4%로서 3단에 해당하는 회전속도인 4600 rpm에서 나타남을 알 수 있다. 동력은 회전수가 커질수록 증가하며, 이는 유량 변화에 대하여 수력학적 동력이 선형적으로 증가하기 때문으로 여겨진다. 양정은 회전수가 커질수록 증가하는데, 유량이 증가함에도 불구하고 양정이 증가하는 이유는 Fig. 5에 나타난 펌프 흡입구와 토출구의 압력차의 그래프에서 찾을 수 있다. 펌프의 회전수가 증가함에 따라서 양정 계산 시 많은 비율을 차지하는 압력차가 증가하기 때문에 총양정이 증가하며, 이는 일반적으로 회전수의 제곱에 비례하는 양정의 경향과 비교적 동일한 특성이 나타났다고 할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에 연료의 온도를 변화시킬 때 회전수에 대한 양정 및 유량의 변화를 나타내었다. 양정과 유량 모두 회전수가 커질수록 증가하고 있으나, 온도가 증가함에 따라서 양정은 증가하고 유량은 감소하였다. 온도가 증가할수록 압력차는 낮아지는 반면 연료 자체의 밀도가 감소하기 때문에 밀도에 반비례하는 양정은 증가하게 된다. 유량의 경우 온도가 증가하게 되면 연료의 증기압이 상승하게 되고 따라서 캐비테이션의 발생이 증가할 수 있다. 회전수 변화에 따른 NPSH_{av}의 변화를 나타낸 Fig. 8를 살펴보면 온도가 증가함에 따라 NPSH_{av}는 감소하게 되고 이것은 국부적인 캐비테이션

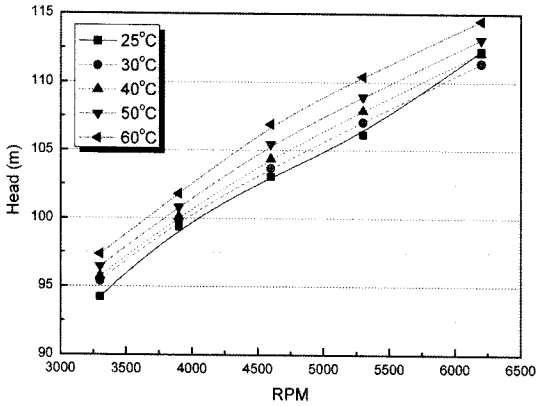


Fig. 6. Head variation with RPM.

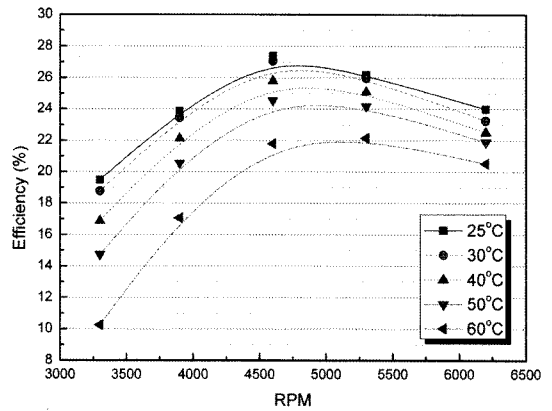


Fig. 9. Variation of efficiency.

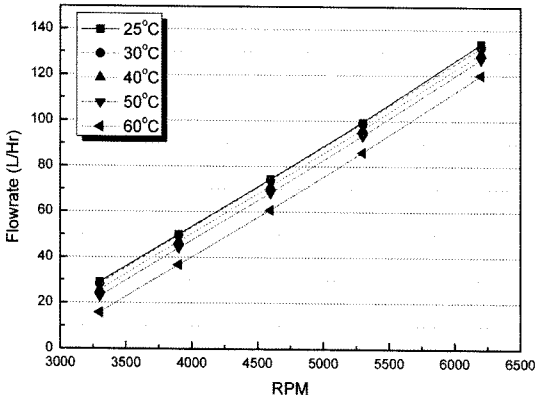


Fig. 7. Flow variation RPM.

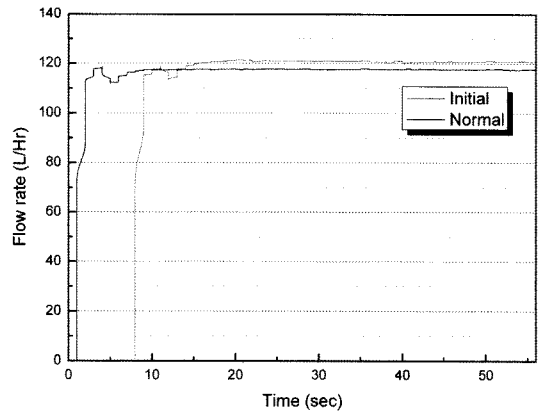


Fig. 10. Effect of vapor-lock.

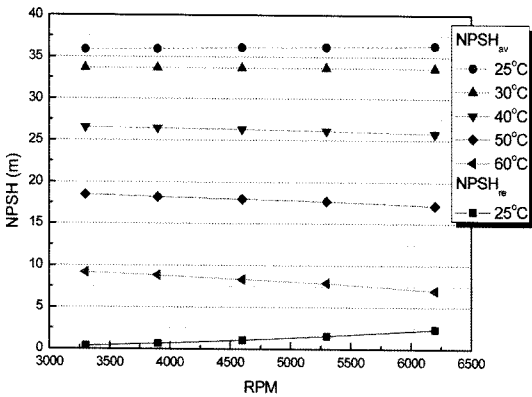


Fig. 8. Variation of NPSH.

발생 가능성이 높아짐을 의미한다. 즉, 캐비테이션에 의해서 양정이 급격하게 떨어지는 캐비테이션 발생한 계에 이르기 전에 부분적인 캐비테이션이 발생하여 유량이 감소하고, 이러한 현상이 온도가 증가할수록 펌프 성능에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 9의 온도 변화에 따른 효율 특성을 살펴보면, 모든 온도 조건에 대해서 설계점까지 증가하였다가 다시 감소하는 일반적인 펌프의 성능특성과 동일한 경향을 보이고 있다. 온도가 상승할수록 캐비테이션 발생에 의해서 유량이 감소하고, 추가적인 동력감소로 인한 효율 저하 현상이 나타났다. 60°C 조건의 경우 최대효율이 5300 rpm에서 22.1% 정도로 낮은 효율을 보이고 있으며 비교적 낮은 온도 조건인 25°C의 경우도 최대효율이 높지 않다. 비속도가 높은 펌프임에도 불구하고 펌프의 효율이 낮은 것은 작동유체의 점성이 아주 낮아서 임펠러와 바깥 케이싱 사이의 유체에 의한 원판마찰 손실이 증가하였고[10,11], 멀티밸브와 압력조정기에 의한 기계적 손실이 크기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 연료 계통의 온도 상승 직후의 펌프 성능과 일반적인 작동 모드에서의 펌프 성능을 시간의 경과에 따라 비교한 그래프를 나타낸 것이다. 일반 작동 모드에서 펌프를 작동할 경우 시간지연이 거의 나타나지 않으나, 온도가 상승한 직후에 최초로 펌프를 작동

시킨 경우 약 7초 정도의 시간 지연 후에 정상적으로 펌프가 작동되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 연료 계통 내에서 잔압이 없는 경우 온도 상승에 의한 베이퍼록의 발생이 영향을 미친 것으로 판단된다.

가솔린이나 디젤용 연료 펌프의 경우 펌프 외부에 체크 밸브가 장착되어 있어, 펌프 정지 후 밸브 스프링에 의해서 닫히게 되어 연료 계통에 잔압을 유지하게 한다. 그러나 본 실험에 사용된 LPG용 연료펌프의 경우 체크 밸브가 장착되어 있더라도 압력조정기에서 소량의 누설이 지속적으로 일어나기 때문에 잔압이 유지되지 않는다. 잔압이 없으면 엔진 정지 직후의 연료 계통의 온도 상승에 의한 베이퍼록이 발생할 수 있으며[9], 시동 시 연료 펌프가 작동하기 시작하여 연료 계통의 연료 압력이 상승해서 연료가 분사될 때까지 시간이 소요되며, 재시동성능이 나빠진다.

IV. 결 론

LPG 액상연료공급 시스템의 가장 핵심적인 부품인 임펠라 타입의 연료펌프를 이용하여 성능평가를 수행하여 일반적인 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유량은 회전수가 증가함에 따라 커지고, 효율의 경우 회전수에 대해서 설계점까지 증가하였다가 감소하는 일반적인 펌프와 동일한 특성을 보이고 있다.

2) 동력은 유량 변화에 대하여 수력학적 동력이 선형적으로 증가하기 때문에 회전수가 커질수록 증가하며, 펌프의 총 양정 또한 회전수가 증가함에 따라 양정 계산 시 많은 비율을 차지하는 압력차가 증가하기 때문에 증가하는 경향을 보인다.

3) 온도가 증가하게 되면 연료의 증기압이 상승하게 되고 따라서 캐비테이션의 발생이 증가하여 유량이 감소하게 된다.

4) 온도가 상승할수록 캐비테이션 발생에 의해서 유량이 감소하고, 추가적인 동력감소로 인한 효율저하 현상을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M.E. Payne, J.S. Segal, M. Newkirk and L.R. Smith, "Use of Butane as an Alternative Fuel Emissions from a Conversion Vehicle Using Various Blends", SAE 952496, (1995)
- [2] Baik, D., "A Study on Emission Characteristics in A LPG Vehicle", *Transaction of KAIS*, 7(6), 993-997, (2006)
- [3] Kang, K., D. Lee, S. Oh and C. Kim, "Performance of an Liquid Phase LPG Injection Engine for Heavy-duty Vehicles", SAE 2001-01-1958, (2001)
- [4] Gang, T. and J. Sim, "Development of Fuel Pump for LPLi", KSAE Fall Conference Proceeding, 525-530, (2004)
- [5] Fox, R.W. and A.T. McDonald, Introduction to Fluid Mechanics, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., (1994)
- [6] Lee, S. and S. Kim, "A study on Performance Characteristics for a Mini Turbo-pump", *Journal of the Research Institute of Technology*, 18(2), December, (2003)
- [7] Choi, K., B. Kim and K. Kim, "An Analysis of Performance and Cavitation Characteristics of the Water Pump in Automobile Cooling System", *The Kyung Hee Journal of Laser Engineering*, 7, 89-99, (1996)
- [8] Svedberg, G.C., G.E. Totten, Y.H. Sun and R.J. Bishop, "Hydraulic System Cavitation: Part II~A Review of Hardware Design-related Effects", SAE 1999-01-2857, (1999)
- [9] Tanimura, N., "Establishment of a Test Method for Fuel Pump Vapor Lock", SAE 2001-01-0991, (2004)
- [10] Li, W., "Effects of Viscosity of Fluids on Centrifugal Pump Performance and Flow Pattern in the Impeller", *Internatioal Journal of Heat and Fluid Flow*, 21 207-212, (2000)
- [11] Stepanoff, A.J., Centrifugal and Axial Flow Pumps; Theory, Design, and Application, Krieger Publishing Company, (1992)