

## 자동차용 LPG 연료펌프의 윤활성 개선에 관한 연구

김창업\* · 최교남\* · 강건용\* · 박철웅\*

### A Study on the Improvement of Lubrication Characteristics for Fuel Pump in LPG Engine

Changup Kim, Kyonam Choi, Keryong Kang and Cheolwoong Park

**Key Words:** Liquid phase LPG injection(LPG 액상분사), Roller-vane type(롤러-베인형), External type(외장형), Fuel pump(연료펌프), Lubrication(윤활)

#### 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. Self acting lubricated groove design or coating can be used in high-speed and high precision spindle system like a roller-vane type fuel pump, because of its advantages such as low frictional loss, low heat generation, averaging effect leading better running accuracy and simplicity in manufacturing. Those design method can also affect the atomization of fuel from the injector and the formation of fuel film on the intake manifold. In this study, experiments are carried out to get performance characteristics of initial and steady state operation. The characteristics of vane type fuel pump were investigated to access the applicability on LPLi engine.

#### 1. 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,

벤츄리에서 연료와 공기가 혼합되기 때문에 혼합기의 정밀한 공연비 형성이 어려워 LEV III와 같은 강화된 차세대 배출가스규제에 대한 대응이 불가능하고, 가스 공급에 의한 저응답성, 출력감소, 겨울철 기화불량에 따른 시동성 저하 등의 문제점이 있다<sup>(1,2)</sup>.

이에 대한 대책으로서 적용되고 있는 제3세대 LPG 연료공급방식인 LPLi(Liquid Phase LPG Injection) 시스템은 LPG연료를 펌프를 이용해서 고압으로 승압하고 이를 액상상태에서 인젝터를 이용해서 분사하는 방식으로, 믹서 시스템에 비해 출력 성능이 약 15% 정도 증가하여 동급 가솔린차량과 대등한 가속성능 및 출력을 내고 있으며, 연비도 약 7~9% 개선되는 것으로 평가되고 있다<sup>(3)</sup>. LPG 가스의 특성상 낮은 배출가스로 인해서 촉매에도 부하를 줄여줌으로써 촉매원가가 저감되는 이점이 있다<sup>(4)</sup>.

(2010년 9월 17일 접수 ~ 2010년 10월 20일 심사완료, 2011년 3월 10일 게재확정)

\*한국기계연구원

\*책임저자, 회원, 한국기계연구원

E-mail : cwpark@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7928 FAX : (042)868-7305

Table 1. Specification of fuel pump

Item	Specification
Working pressure	$\Delta P$ of max 1 MPa
Pump flow	Max 140 L/hr @ 2,800 rpm
Setting pressure relief valve	1.1~1.3 MPa
Dry run capacity	3,000 Hr
Endurance life	5,000~10,000 Hr
Furl contamination	up to 0.7mm
Min. temperature	-25°C
Max. temperature	90°C
Safety valve setting	2.5 MPa

이러한 LPLi 방식은 원활한 LPG 액상연료공급을 위한 연료펌프가 가장 핵심적인 부품으로서 지속적으로 일정량의 연료량을 토출 하는 것이 주된 기능이다. Table 1에 나타낸 것과 같이 연료펌프의 기본적인 스펙은 기존 펌프와 크게 다르지 않지만, 현재까지의 모든 자동차제작사에서 채택한 방식이 선진 외국기술을 이용하여 상대적으로 고가이기 때문에 이에 대한 국산화 실용화 연구가 필요한 실정이다. 기존 펌프의 경우는 5개의 다이어프램 펌핑부에 의한 연료의 토출이 일어나는 방식이다. 이는 다이어프램의 한쪽 면은 LPG와 접하고 있고 나머지 한쪽 면은 윤활유와 접하고 있어 다이어프램의 변형으로 연료펌프의 성능을 저하시킬 수 있는 문제점이 있다. 이런 문제를 보완하기 위해 원심형 임펠라 타입의 펌프가 개발 중에 있으나, 자동차 적용 시의 가장 중요한 품질특성인 내구 운전능력의 확보가 가장 큰 문제가 되고 있다.

특히 LPG 액상분사방식용 연료펌프의 내구 운전능력에 영향을 주는 인자는 베어링을 비롯한 여러 마찰 운전부에서 윤활제로 작용하고 있는 액상 LPG 연료의 점도가 낮기 때문에 발생하는 부품의 조기 트라이블로직 손상이다. 주요 마찰 작동 부품인 로터의 접촉면에 윤활특성 개선을 위한 설계가 적용될 경우 내구성은 물론 토출성능도 향상될 가능성이 있다.

그 중에서도 드라이 가스 시일(seal)과 같은 경우 실링 인터페이스가 액체 필름 부상 비접촉 또는 고체 접촉 미케니컬 시일보다 매우 작은 마찰열을 발생하는 안정성 높은 매우 얇은 가스 필름을 갖는다는 특성 때문에 탁월한 성능을 보인다. 일반적으로 평범한 윤활 면을

갖는 가스 윤활 트라이보 요소에서는 가스의 점성이 액체에 비해 상당히 작아(2 order less) 안정된 윤활 필름 형성에 필요한 충분한 유체동압 효과(hydrodynamic effect)가 발생하기 어렵다. 이의 극복을 위해 드라이 가스 시일은 흔히 스파이럴 그루브 기하 형상의 유체동압 자기부상 메카니즘(hydrodynamic self-acting lifting mechanism)을 채택하고 있으며, 이는 스파이럴 그루브가 타 형상에 비해 최적의 설계성능을 갖기 때문이다.

Shapiro 등<sup>(5)</sup>은 스파이럴 그루브 가스 시일이 누설을 효과적으로 억제하고 러빙(rubbing) 접촉을 방지할 수 있는 성능을 확인하여, 액체 산화제(Liquid oxygen, LOX)용 터보펌프에 대한 가장 중요한 적용 후보임을 보고한 바 있다. 이안성 등<sup>(6,7)</sup>은 스파이럴 그루브 드라이 가스 시일에 일반화된 Galerkin 유한요소법을 적용하여 저속(3,600 RPM)과 고속(15,000 RPM)에서 종합 윤활 성능해석을 수행하였다. 저속 적용의 경우 낮은 속도에서도 효과적 부상 및 안정적 설계 틈새 유지가 요구되며, 따라서 실링 필름(sealing film)의 개방력과 강성 증대 차원에서 유체동압 효과를 강화시키는 설계가 선호된다. 고속 적용의 경우 가스 시일 시스템의 동적 안정성이 무엇보다도 확보되어야 하며, 이를 위해 우선적으로 실링 필름의 축방향 감쇠가 양(positive)이 되는 설계 즉, 저속의 경우와는 반대로 유체동압 효과를 약화시키는 설계가 요구된다. 이를 반영하여 고속적용의 경우 시일의 그루브 기하형상 설계에서는 작은 그루브 개수, 낮은 그루브 깊이, 제로 그루브 테이퍼, 그리고 비교적 높은 그루브 각이 채택된다.

위와 같은 스파이럴 그루브가 적용되면 윤활특성의 개선을 통한 향상된 연료펌프의 내구성 및 초기 토출성능이 기대될 수 있다. 시동초기는 물론, 고회력이 요구되는 운전조건에서도 인젝터를 통해 분사되는 연료의 흡기매니폴드에서 액막 형성을 억제하고 미립화 특성을 개선시킬 수 있기 때문에, 본 연구에서는 주요 마찰 작동 부품인 캐리어 흡입면의 스파이럴 그루브 적용에 따른 영향을 살펴보고자 하였다.

우수한 가압 및 유량성능을 가지며, 연료탱크 외장형으로 개발 중에 있는 롤러-베인형 연료펌프를 이용하여 초기토출 및 정상작동시의 연료유량 및 연료압력, 소모 전력 등의 일반적인 특성을 살펴보고, 3,000 RPM 이하의 저속에서 운전되는 연료펌프의 윤활특성 개선을 위한 설계의 변화에 따른 적용가능성 여부를 파악하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험은 LPLi 연료 공급 시스템을 적용한 엔진에서 LPG 펌프의 성능 특성을 관찰하기 위해 실제 연료시스템을 사용하였다. Fig. 1의 실험장치 개략도와 같이 차량 내 연료펌프의 환경과 동일한 조건을 구현하기 위해 가시화 창이 장착된 정적 연료탱크와 외부에 장착이 가능하도록 개발된 연료펌프 및 필터 등으로 연료 공급 시스템을 구성하고, 연료라인에 온도, 압력 센서 및 유량계를 장착하여 각 단계별 운전 조건에서 연료탱크 내 LPG 연료 및 승압된 연료의 물성치를 취득하였다. Table 1은 연료펌프의 주요 설계사항을 나타낸 것이다.

Fig. 2에 본 연구의 대상인 롤러-베인형 펌프의 개략도를 나타내었다. 펌프는 롤러, 로터 및 펌프 스페이스로 구성되어 로터가 회전하면, 6개의 롤러가 원심력에 의해 펌프 스페이스의 안쪽 벽으로 이동하여 체적이 넓은 부분을 통과할 때 연료를 흡입하고 체적이 좁은 부분을 통과할 때 연료에 압력이 형성되어 송출하는 구조로 되어있다<sup>(8)</sup>. Fig. 3은 운항특성 개선을 위한 스파이럴 그루브가 적용된 로터의 사진으로서, 가로와 세로가 각각 250 nm, 10 μm의 간격으로 가공되어 있으며 깊이는 2.5~3 μm 정도이다.

일반적인 하절기의 사용 연료를 모사하여, 부탄(Butane)

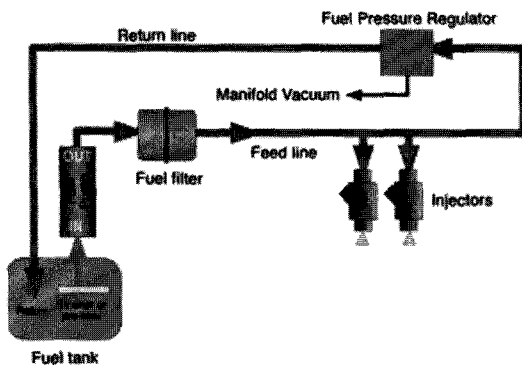


Fig. 1 Schematic diagram of rig setup for fuel pump test

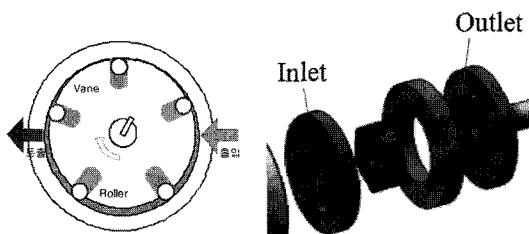


Fig. 2 Schematic diagram of pumping part and 3D model

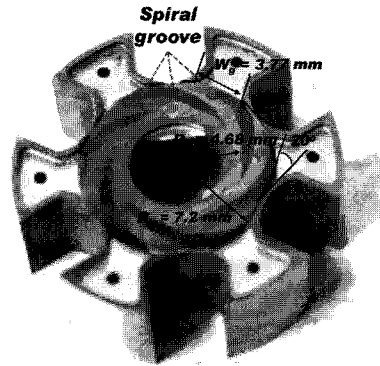


Fig. 3 Photograph of spiral groove face for a rotor sample

과 프로판(Propane)이 각각 95%, 5% 함유된 연료에 대해서 실험하였다. 연료 펌프는 PWM(Pulse Width Modulation) 신호의 Duty 가변에 의한 회전수 조절이 가능한 펌프 전용 제어기(Driver)에 의해 제어되었으며 입력전압은 13.5V로 고정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 해석결과 고찰

스파이럴 그루브에서 외경 그루브 입구로부터 흡입된 가스는 메이팅 링(mating ring) 표면의 회전에 의해 그루브 내경 쪽으로 움직임에 따라 부피가 축소되어 그루브가 존재하지 않은 경우에 비해 증대된 압력을 생성시키게 되며, 일정한 깊이로 음각된 원형 그루브를 만나 부가적 압력 증대 및 압력 균일화 효과를 갖게 된다<sup>(9)</sup>.

Pressure Gen. of LPG Pump Carrier Thrust Bearing

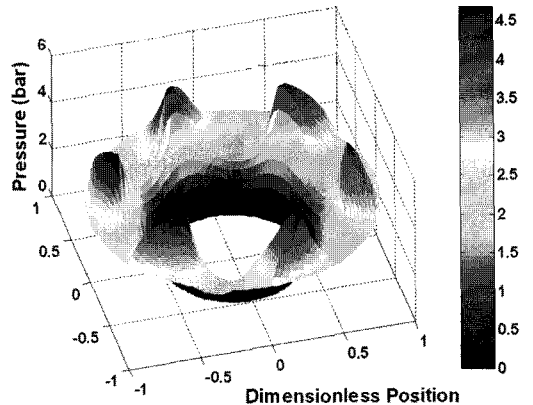


Fig. 4 Generated pressure distribution at 3,000 RPM operating condition

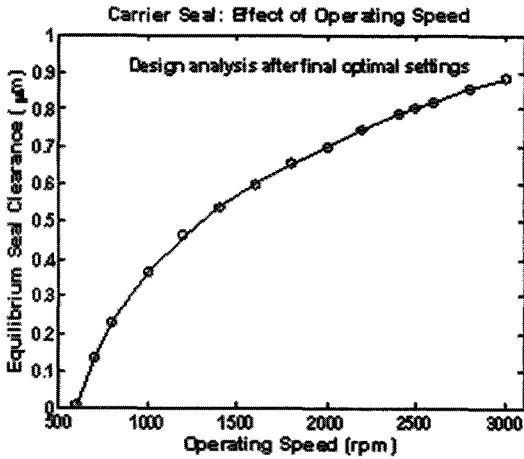


Fig. 5 Effect of operating speed on variation of equilibrium clearance

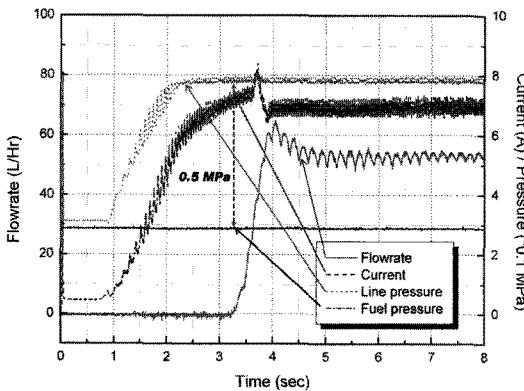


Fig. 6 Initial performance curves of roller-vane type pump

Fig. 4는 해석을 통해서 개방력(opening force)와 폐쇄력(closing force)의 평형상태 틈새와 3,000 RPM의 회전속도에서 생성된 평형상태 압력의 분포를 보여 준다. 최대 생성압력은 0.469 MPa로 유체동압 효과에 의해 상당한 압력이 발생하였으나, 연료공급 시스템 상의 압력조정기에 의한 펌프부 전단과 후단의 압력차인 0.5 MPa에는 미치지 못한 값이다. 따라서 스파이럴 그루브의 적용에 의한 성능개선의 효과는 실험을 통해서 검증이 되어야 할 것으로 보인다.

Fig. 5는 운전속도에 대한 평형상태의 틈새 변화를 보여주며, 500 RPM에서 3,000 RPM으로 증가함에 따라 평형상태의 틈새가 0.9 µm까지 증가함을 알 수 있다.

### 3.2 실험결과 고찰

Fig. 6는 상온 조건인 20°C에서 연료펌프의 초기토출

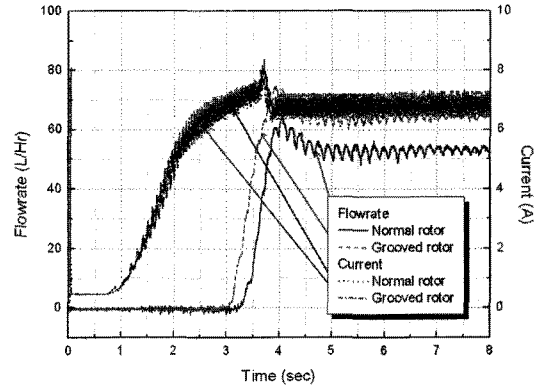


Fig. 7 Effect of spiral grooved rotor on initial performance

시 측정된 유량과 압력 및 소모전류를 나타낸 그래프이다. 펌프의 성능은 연료의 종류에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 본 실험에서는 우리나라에서 동절기를 제외한 시기에 일반적으로 사용되는 부탄 95%의 연료를 사용하여 성능시험을 실시하였다. 펌프의 제어는 전원이 공급된 후 일정시간 동안 중부하 조건에서의 성능을 유지하다가 Idle 조건으로 감소되도록 하였다. 유량을 기준으로 하여 토출시기를 살펴보면 3초 이후에야 라인상에 연료가 흐르는 것을 알 수 있다. 로터의 회전에만 토출시의 롤러의 움직임에 의한 펌프작용이 유량값의 변동으로 나타나고 있으며, 시간이 지날수록 안정화되어 유량변동이 감소하였다.

압력선도와 비교하면 압력조정기에 의해 제어되는 압력인 라인상의 압력이 연료탱크의 압력대비 0.5 MPa에 도달한 후 연료의 흐름이 나타나고 있다. 이러한 결과는 재생형 연료펌프를 사용한 이전의 연구결과<sup>(10)</sup>에 비해 상당히 느린 초기 토출성능을 보이고 있는 것이며, 이를 고려할 때 롤러-베인형 연료펌프가 장착된 LPG 차량의 경우 시동을 위해서는 최소 3초 이상의 예비시간이 필요할 것으로 판단된다.

유효특성 개선을 위해 스파이럴 그루브 로터를 사용하였을 때의 초기토출유량 및 소모전력 결과를 Fig. 7에 일반 로터와 비교하여 나타내었다. 유체동압 효과에 의한 압력의 발생으로 틈새가 생성되고 이로 인해 흡입면과의 접촉 마찰이 감소되어 소모전류 값이 저하될 것으로 예상하였으나, 펌프능력 향상으로 인하여 작동유체의 부하에 의한 소모전류의 증가 효과가 보다 크게 나타나 소모전류가 증가하는 결과를 보였다. 정상상태인 Idle 조건에서도 20.4% 정도 상승된 유량값을 나타낸 것에 반하여 소모전류의 증가량이 10.1% 정도로 낮은 것

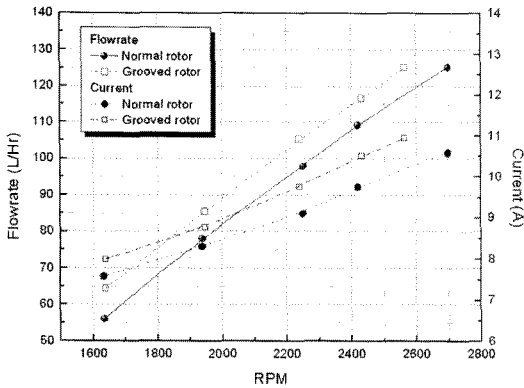


Fig. 8 Effect of spiral grooved rotor on the variation of flow rate and current

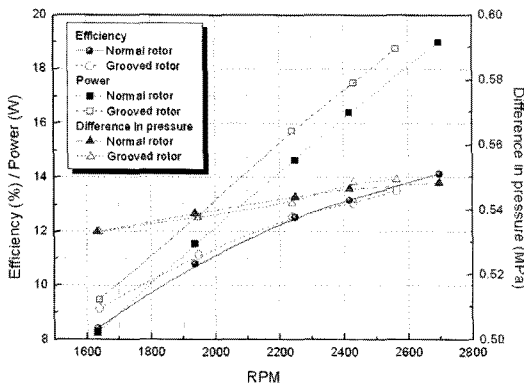


Fig. 9 Effect of spiral grooved rotor on the variation of efficiency and power

은 틈새의 생성으로 인한 마찰 감소가 영향을 준 것으로 판단된다. 스파이럴 그루브에 의한 영향은 초기토출 시기를 통해서도 확인할 수 있으며, 일반 로터를 사용한 경우에 비해 토출시기가 약 0.3초정도 당겨졌다.

Fig. 8에 로터의 변화에 따른 회전속도에 대한 유량 및 소모전류의 변화를 나타내었다. 초기토출 결과에서와 유사하게 펌핑능력의 향상으로 인한 유량의 증가와 함께 소모전류의 증가 현상을 확인할 수 있다. 대부분의 회전속도 영역에서 7~8 L/Hr 정도로 일정하게 유량이 증가하였으나, 소모전류의 증가는 회전속도의 증가에 비례하였다. 회전속도가 증가할수록 유량이 증가하게 되고 이때 요구되는 부하만큼의 소모전류가 증가하게 된다. 그러나 낮은 로터 회전속도에서 일단 틈새가 생성된다면, 로터와 흡입면 사이의 마찰저항은 회전속도가 증가하더라도 크게 변하지 않기 때문에 회전속도에 비례하는 소모전류의 감소를 기대할 수 없다.

단, 최대속도 제어 영역에서 스파이럴 그루브 설계가 적용된 로터의 경우 일반 로터에 비해 회전속도가 감소되고, 이 때 유량은 거의 같은 값을 보이나 소모전류가 약간 증가하였다. 이것은 펌핑부의 설계상 한계점에 도달한 결과로 예상된다. 본 연구에 사용된 펌핑부의 펌프 스페이스에 의한 로터와 흡입 및 토출면과의 간극은 13~15  $\mu\text{m}$ 로서 최대 토출 유량이 125 L/Hr 정도를 보이고, 이 보다 높은 값의 최대 유량이 토출되기 위해서는 정밀가공을 통한 간극의 감소가 이루어져야 할 것으로 보인다.

펌프의 회전속도에 따른 효율 및 동력의 변화를 나타낸 Fig. 9를 살펴보면, 회전속도의 변화하더라도 압력차는 거의 같은 값을 보이는데 반해 유량이 증가하기 때문에 동력 또한 증가했음을 알 수 있다. 그러나 유량의 증가와 함께 소모전류도 증가하기 때문에, 저속에서 8.6% 정도의 효율 향상을 제외하면 스파이럴 그루브 설계의 적용에 의한 효율 향상 효과는 크지 않다.

일반 로터와 윤활개선 설계가 적용된 로터의 최대 효율은 각각 14.1%와 13.5%로 기존의 LPG 연료펌프로 이용되는 재생형 펌프의 효율에 비해 낮은 값이다. 이러한 결과는 롤러-베인방식 연료펌프를 LPG 액상분사방식 연료펌프로 사용할 경우, 외장화에 유리하고 증압능력이 충분한 장점에 비해 낮은 효율 및 윤활개선 설계 등의 적용과 같은 단점이 충분히 고려되어야 함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 LPG 액상연료공급 시스템의 가장 핵심적인 부품인 외장형 연료펌프에 로터의 윤활개선 설계를 적용하여 성능평가를 수행하여 일반적인 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 로터의 윤활성능 개선을 위해 스파이럴 그루브 설계를 적용하여 윤활 성능해석을 수행하였다. 평형상태의 틈새 해석을 통해, 유체동압 효과에 의한 0.469 MPa의 최대 압력생성을 얻을 수 있었다.
- 2) 그루브 기하형상과 유체동압 효과에 의한 부상 틈새는 로터의 회전속도가 증가함에 따라 최대 0.9  $\mu\text{m}$ 까지 증가하였다.
- 3) LPG 차량에 롤러-베인형 연료펌프가 장착된 의 경우 상대적으로 느린 초기토출성능으로 인해서, 시동을 위해서는 최소 3초 이상의 예비시간이 필요할 것으로

보인다.

4) 스파이럴 그루브 로터를 사용한 경우, Idle 조건에서 유량이 20.4% 정도 상승된 것에 반하여 소모전류의 증가량이 10.1% 정도로 낮은 것은 부상 틈새의 생성으로 인한 마찰 감소가 영향을 준 것으로 판단된다.

5) 대부분의 회전속도 영역에서 정상상태 운전시 스파이럴 그루브 로터를 사용한 경우, 일반 로터에 비해 펌핑능력의 향상으로 인한 유량의 증가와 함께 소모전류가 증가하였다.

### 참고문헌

- (1) Michael, E. Payne, Jack, S. Segal, Matthew Newkirk and Lawrence R. Smith, "Use of butane as an alternative fuel emissions from a conversion vehicle using various blends", *SAE technical paper*, 952496, 1995.
- (2) D. S. Baik, "A Study on Emission Characteristics in A LPG Vehicle", *Transaction of KAIS*, Vol. 7, No. 6, pp.993~997, 2006.
- (3) K. Y. Kang, D. Y. Lee, S. M. Oh and C. U. Kim, "A Fundamental Study on a MPI LPG Engine for Heavy-duty Vehicles", *COMODIA 2001*, 3-02, pp.358~364, 2001.
- (4) K. Y. Kang, D. Y. Lee, S. M. Oh and C. U. Kim, "Performance of an liquid phase LPG injection engine for heavy-duty vehicles", *SAE technical paper*, 2001, 2001-01-1958.
- (5) W. Shapiro, J. Walowit and H. F. Jones, "Analysis of Spiral-groove Face Seals for Liquid Oxygen", *ASLE Transaction*, Vol. 27, No. 3, pp.177~188, 1984.
- (6) A. S. Lee, J. H. Yang and D. H. Choi, "Lubrication Performance Analysis of Spiral Groove Dry Gas Seals - Part I: FE Analysis and Basic Performance Evaluation", *Journal of the KSTLE*, Vol. 20, No. 2, pp.58~67, 2004.
- (7) A. S. Lee, J. H. Yang and D. H. Choi, "Lubrication Performance Analysis of Spiral Groove Dry Gas Seals - Part II: Detailed Performance Evaluation of Groove Design Parameters", *Journal of the KSTLE*, Vol. 20, No. 2, pp.68~76, 2004.
- (8) D. Danardon, K. S. Kim, E. Roziboyev and C. U. Kim, "Design and Optimization of an LPG Roller Vane Pump for Suppressing Cavitation", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 3, pp.323~330, 2010.
- (9) A. S. Lee and J. H. Kim, "Lubrication Performance Analysis and Experiment of a Low-Speed Dry Gas Seal having an Inner Circular Groove", *Journal of the KSTLE*, Vol. 21, No. 2, pp.53~62, 2005.
- (10) C. W. Park, C. U. Kim and K. N. Choi, "A Study on the Performance Characteristics of a Fuel Pump in LPG Engine", *Journal of the KIGAS*, Vol. 11, No. 4, pp.10~16, 2007.