

# LPLi 연료펌프 적용을 위한 저어널 베어링의 설계 적합성 해석

이안성<sup>†</sup> · 김창업\*

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부  
\*한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부

## A Design Fitness Analysis of Journal Bearings for LPLi Fuel Pump Application

An Sung Lee<sup>†</sup> and Chang Up Kim\*

System Engineering Research Div.

\*Green Environment Energy Machinery Div. Korea Inst. of Machinery and Materials, Daejeon 305-600, South Korea

(Received July 21, 2009; Revised August 31, 2009; Accepted September 4, 2009)

**Abstract** – In this study a complex design fitness analysis of journal bearings is carried out for the LPLi rotary-vane fuel pump application, as an external and horizontal installation, in LPG vehicles. Bearings considered in the analyses are plain and 3-axial groove journal bearings. Upon reflecting the fact that the primary failure mode of bearings in the application is a premature friction and wear failure of bearing metal due to a very low viscosity of liquid fuel LPG as a bearing lubricant, the performance factors of bearings used in an evaluation process of design fitness are a load carrying capacity and vibration suppression ability relative to a rated speed. At this time the design variables of bearings are a radial clearance and length. Results show that, in terms of both of the load carrying capacity and vibration suppression ability, the plain journal bearings are superior to the 3-axial groove journal bearings and among the plain bearings the smaller the bearing clearance ( $5 > 10 > 15 \mu\text{m}$ ) is and the longer the bearing length ( $6 < 8 < 10 < 12 < 14 \text{ mm}$ ) is, the better the bearing performance is.

**Key words** – LPLi(액체상태 LPG 분사), fuel pump(연료펌프), journal bearing(저어널 베어링), load carrying capacity(부하용량), vibration suppression ability(진동저감 능력)

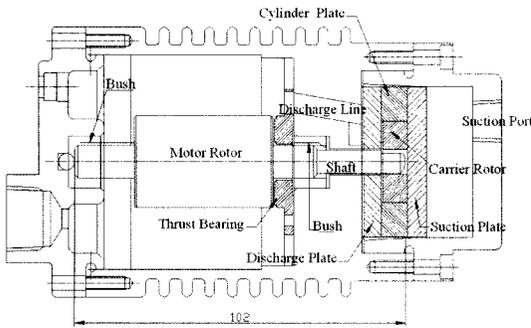
### 1. 서 론

전 세계적으로 차량용 엔진에서 고효율 및 특히 저공해성을 목표로 청정 가스연료의 사용이 증가하고 있으며, 대표적인 청정 가스연료 중의 하나가 바로 LPG(Liquefied Petroleum Gas, 액화석유가스)이다. 한국의 경우 2009년도 6월을 기준으로 LPG자동차의 수가 235만대를 넘어서 세계 제1위의 LPG자동차 보유국이 되었다. 종전의 LPG자동차는 기화기 방식의 제2세대

믹서 연료공급 시스템을 채택하였으며, 기체 상태 LPG의 부정확한 혼합기 공급, 저응답성, 출력감소, 특히, 겨울철 냉시동성 불량 등의 문제점을 안고 있었다[1,2]. 이러한 문제점들을 원천적으로 해결하기 위해, 현재의 LPG 자동차는 제3세대 액체상태 LPG 분사(Liquid Phase LPG Injection, 이하 간단히, LPLi) 연료공급 시스템을 채용하고 있으며, 이의 결과로 LPG 자동차의 출력과 냉시동성 성능이 가솔린 자동차 수준으로 향상되고 있다[3].

LPLi 연료공급 시스템에서 가장 핵심적인 부품모듈

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : aslee@kimm.re.kr



**Fig. 1. Schematic of a LPLi rotary-vane fuel pump being developed as an external and horizontal installation for LPG vehicles.**

인 연료펌프는 현재 연료탱크 내에 설치되는 다이어프램형과 원심형 펌프가 양산 적용되고 있다. 한국은 2003년 세계 최초로 LPLi 전용엔진 자동차의 상용화를 이루는 성과를 달성하였으나, 연료펌프는 아직 외국 기술에 의존하고 있다. 현재까지 연료펌프를 국산화하기 위한 여러 연구가 매우 활발하게 진행 중으로, 자동차 적용의 가장 중요한 품질특성인 내구성 운전능력의 확보가 가장 문제가 되고 있다[4,5].

LPLi 연료펌프에서 내구성 운전능력의 주요 문제의 하나는 베어링을 비롯한 여러 마찰 운전부에서 윤활제로 작용하고 있는 액체연료 LPG의 점성이 매우 낮아 발생하는 부품의 조기 트라이블로지적 손상이다. 20°C 대기압 조건에서, 액체 LPG의 점성은  $1.448 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로, 공기의 점성  $1.821 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 그리고 특히 40°C에서 라이트 터빈 오일(ISO VG32)의 점성  $2.615 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 에 비교할 때, 액체 LPG는 매우 열악한 윤활 운전조건 상태이다.

Fig. 1은 현재 LPG 차량 적용을 위해 외장/수평방향 설치 형태로 개발되고 있는 LPLi 로터리 베인 펌프의 개략도를 보여 주고 있다. 편심된 캐리어 로터의 회전에 따라 캐리어 내에서 왕복 운동을 하는 롤러에 의해 액체 LPG가 흡입측에서 토출측으로 펌핑되며, 이때 토출 플레이트 측에 작용하는 압력에 의해 축방향으로 자유로이 플로우팅하는 캐리어가 흡입 플레이트에 밀착되어 운전된다. 따라서, 개발 연료펌프에서 급속한 마찰마멸에 의한 조기 손상을 일으켜서 궁극적으로 연료 펌프의 기능상실을 초래할 수 있는 주요 후보 부품은 캐리어/흡입 플레이트와 전체 펌프 로터는 지지하는 2개의 부쉬 저어널 베어링이다. 자동차 엔진 적용을 위해서 연료펌프는 최소 15만 km의 주행 내구

수명을 만족하여야 하기 때문에, 액체연료 LPG의 열악한 윤활성에도 불구하고 이들 취약 부품의 운전 내구성을 보장하기 위한 설계가 매우 중요한 현안이 된다. 한편, Lee와 Kim[6]은 LPLi 로터리 베인 연료펌프의 캐리어/흡입 플레이트의 열악한 윤활 내구성을 근본적으로 개선하기 위해, 액체 LPG의 낮은 점성에서도 원활한 적용이 가능한 스파이럴 그루브 시일 설계를 캐리어의 흡입 면에 채택하였다.

본 연구에서는 LPG 자동차의 외장/수평방향 설치 LPLi 로터리 베인 연료펌프에 적용을 위한 저어널 베어링의 설계 적합성 해석을 수행하였다. 해석에 고려된 베어링은 평 저어널과 3-축방향 홈 저어널 베어링이다. 베어링 윤활제로 사용되는 액체연료 LPG의 점성이 매우 낮아 베어링의 대표적 손상 모드가 베어링 메탈의 조기 마찰마멸 손상인 점을 반영하여, 설계 적합성의 평가에 사용된 베어링의 성능인자는 운전속도에 대한 부하용량과 베어링의 로터다이내믹 진동 저감 능력이었다. 그리고 베어링의 설계인자로는 반경틈새와 길이가 상세 분석되었다. 한편, 베어링의 윤활 해석에는 FDM에 기초한 상용S/W인 ARMD가 그리고 펌프 로터-베어링 시스템의 로터다이내믹스 해석에는 FEM에 기초한 자체 개발 프로그램이 사용되었다.

## 2. 해석 모델 및 운전 해석조건

Fig. 1의 수평방향 설치되는 개발 LPLi 연료펌프의 배치구성으로부터, 모터 로터는 부쉬로 표시된 2개의 저어널 베어링으로 수평 지지되며, 축의 오른쪽 끝단에는 펌프의 회전 캐리어가 설치되어 있다. 여기서, 모터 로터 왼쪽에 위치한 부쉬는 베어링 #1, 그리고 모터 로터와 캐리어 사이의 부쉬는 베어링 #2로 명명된다.

Fig. 2는 Fig. 1의 LPLi 연료펌프 전체 로터-베어링 시스템의 등가 유한요소 로터다이내믹스 모델과 함께 정적 해석을 통해 계산된 각 베어링의 하중을 보여준다. 베어링 #1과 #2의 하중은 각각 0.954 N과 1.629 N으로, 베어링 #2에 보다 많은(약 70% 더 큼) 지지 하중이 작용함을 알 수 있다. 등가 모델에서 모터 로터는 베어링 #1과 #2 사이의 4개의 집중 질량/관성, 그리고 펌프 캐리어는 1개의 집중 질량/관성으로 표현되어 있다.

해석의 기준이 되는 베어링의 설계변수는 베어링 길이  $L=8 \text{ mm}$ 와 베어링 반경틈새  $C=10 \mu\text{m}$ 이며, 운전 조건으로 정격속도  $\omega=2000 \text{ rpm}$ 과 액체연료 LPG의 점성  $\mu=1.4475 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 의 고정된 값이 적용된다.

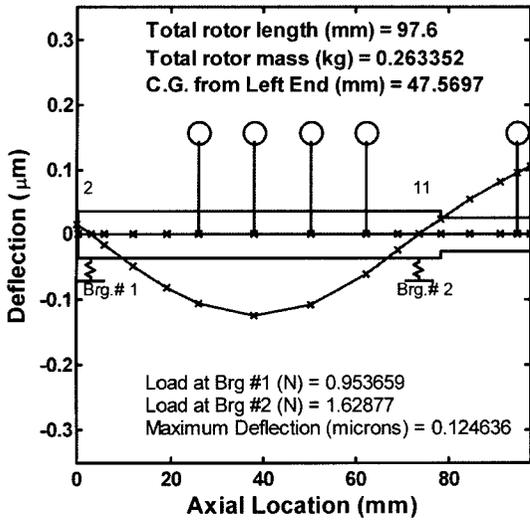


Fig. 2. An equivalent FE rotordynamic model of entire LPG fuel pump rotor-bearing system with static analysis results.

### 3. 해석결과 및 토론

Fig. 2에 나타난 연료펌프 로터-베어링 시스템의 배치 설계의 특성에 기인하여, 예비해석 결과, 적용 베어링에 관계없이 베어링 #2의 작용하중 그리고 캐리어에 추가된 G2.5의 불균형에 대한 베어링 #2 위치에서의 축 진동이 모두 대응하는 베어링 #1에서의 해당 값들 보다 크기 때문에, 본 논문에서는 #2 베어링에서의 성능인자들을 기준으로 베어링 종류별 및 베어링 설계인자의 설계 적합성을 분석·평가하였다.

2000 rpm에서 L=8 mm를 갖는 평 저어널 베어링의 3개 베어링 설계특성 C=5, 10, 15 μm에 대한 생성압력의 분포형상이 Fig. 3에 보여 있다. 설계특성이 증가함에 따라 편심률이 0.507/ 0.787/ 0.883으로 증가하여 베어링의 실제 압력생성 면적이 감소하고, 최소 필름두께는 2.47/2.13/1.78 μm로 감소하여 최대 발생압력은 4.70/6.55/8.18×10<sup>4</sup> Pa로 증가하는 설계특성을 보여, 결과적으로 부하용량이 5>10>15 μm의 순서로 감소함을 알 수 있다. 즉, 부하용량 차원에서 5 μm의 설계특성이 가장 우수하다.

그리고 2000 rpm에서 L=8mm과 30°의 홈 각도(groove angle)를 갖는 3-축방향 홈 저어널 베어링의 3개 베어링 설계특성 C=5, 10, 15 μm에 대한 생성압력의 분포형상이 Fig. 4에 보여 있다. 평 저어널 베어링과 마찬가지로, 설계특성이 증가함에 따라 편심률이 0.612/ 0.823/ 0.898로 증가하여 베어링의 실제 압력생성 면적이 감소하고, 최소 필름두께는 1.94/1.77/1.54 μm로 감소하여 최대 발생압력은 6.73/8.21/9.82×10<sup>4</sup> Pa로 증가하는 설계특성을 보여, 결과적으로 부하용량이 5>10>15 μm의 순서로 감소함을 알 수 있다. 이상의 두 베어링에 대한 해석결과의 비교를 통해 부하용량 차원에서 평 저어널 베어링이 3-축방향 홈 저어널 베어링에 비해 우수하고, 설계특성은 5>10>15 μm의 순서, 즉, 특성이 작을수록 우수한 것으로 분석된다.

한편, Fig. 2의 로터다이나믹스 모델에 대해 2000 rpm에서 L=8 mm 그리고 C=10 μm와 함께 계산된 각 베어링들의 강성과 감쇠계수를 적용하고, 캐리어에 G2.5의 불균형을 추가하여 예측된 불균형 진동응답이 Fig. 5와 6에 보여 있다. Fig. 5로부터, 평 저어널 베

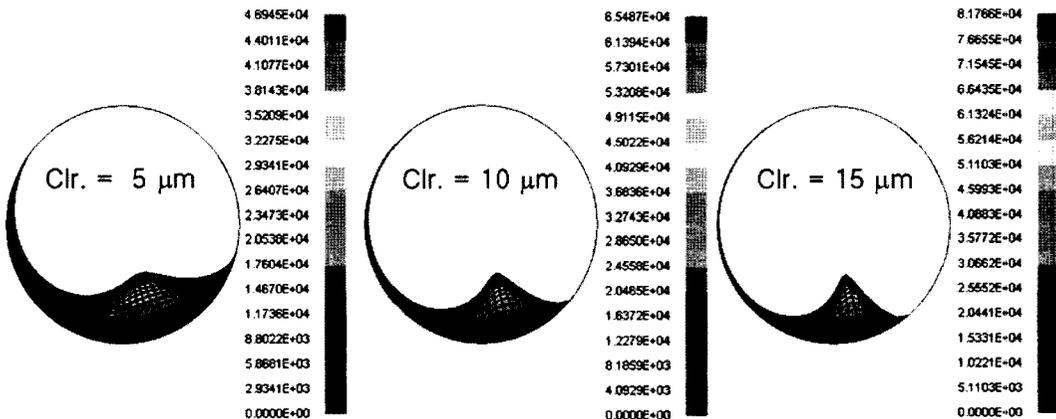


Fig. 3. Generated pressure profiles at 2000 rpm of the plain journal bearing with L= 8 mm for 3 different clearance cases.

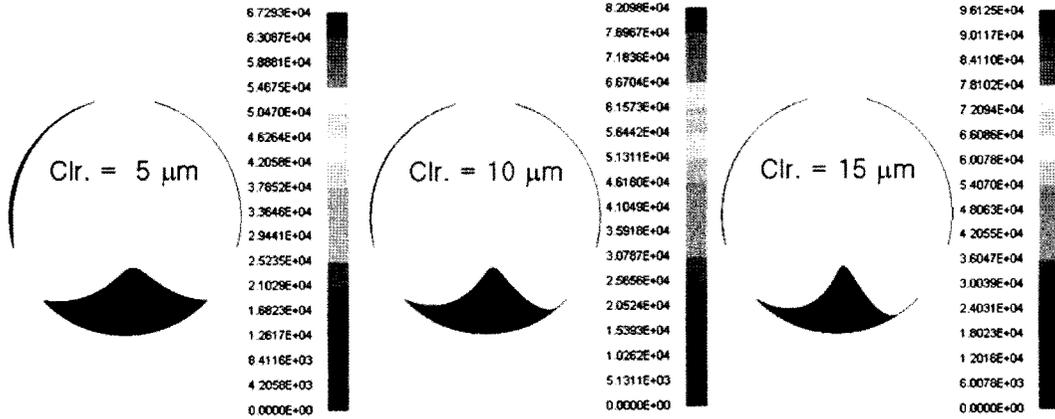


Fig. 4. Generated pressure profiles at 2000 rpm of the 3-axial groove journal bearing with L=8 mm for 3 different clearance cases.

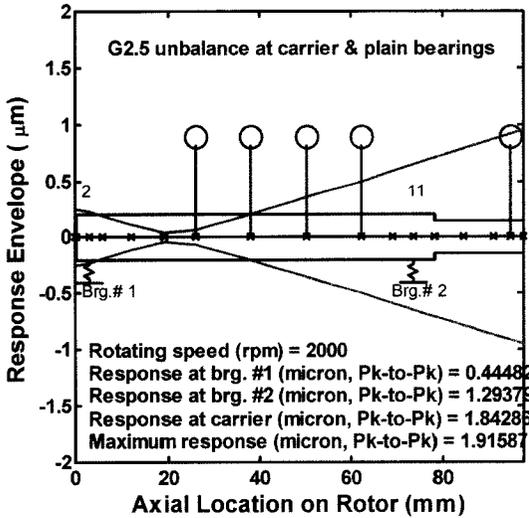


Fig. 5. Unbalance response at 2000 rpm with G2.5 unbalance at the carrier, applying plain journal bearings of L=8 mm and C=10 μm.

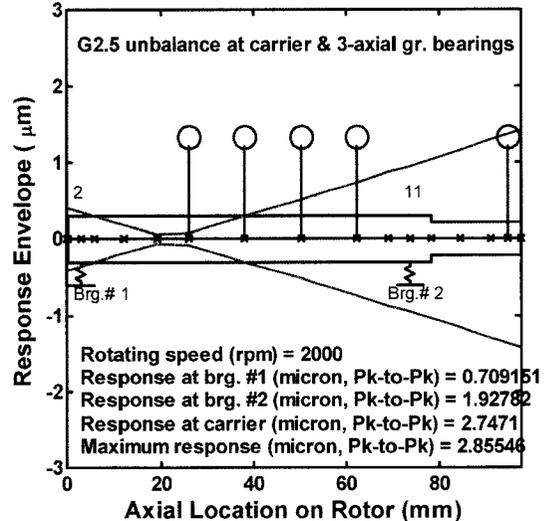


Fig. 6. Unbalance response at 2000 rpm with G2.5 unbalance at the carrier, applying 3-axial groove journal bearings of L=8 mm and C=10 μm.

어링의 경우, 베어링 #2 위치에서 로터의 불균형 진동은 1.29 μm (Pk-to-Pk)으로 예측된다. 그리고 Fig. 6 으로부터, 3-축방향 홈 저어널 베어링의 경우, 베어링 #2 위치에서 로터의 불균형 진동은 1.93 μm(Pk-to-Pk)으로 예측된다. 따라서, 진동저감 능력 면에서도 평 저어널 베어링이 3-축방향 홈 저어널 베어링보다 우수한 것으로 분석된다.

이제, 평 저어널 베어링을 대상으로 베어링 길이의 영향을 해석하였다. 2000 rpm에서 C=10 μm을 갖는 평 저어널 베어링의 5개 베어링 설계길이 L=6, 8, 10, 12, 14 mm에 대한 생성압력의 분포형상이 Fig. 7에 보여 있

다. 설계길이가 증가함에 따라 편심률이 0.856/0.787/0.710/0.628/0.545로 감소하여베어링의 실제 압력생성 면적이 증가하고, 최소 필름두께는 1.44/2.13/2.90/3.72/4.55 μm로 증가하여 최대 발생압력은 10.8/6.55/4.44/3.25/2.53 × 10<sup>8</sup> Pa로 감소하는 설계특성을 보여, 결과적으로 부하용량이 6<8<10<12<14 mm의 순서로 증가함을 알 수 있다. 즉, 부하용량 차원에서 14 mm의 설계길이가 가장 우수하다. Fig. 3과 7의 결과를 종합하여, 부하용량 차원에서, 베어링의 틈새가 감소할수록 그리고 길이가 증가할수록 우수한 설계인 것으로 분석된다.

계속해서, 평 저어널 베어링에 대해, 틈새 C=5, 10,

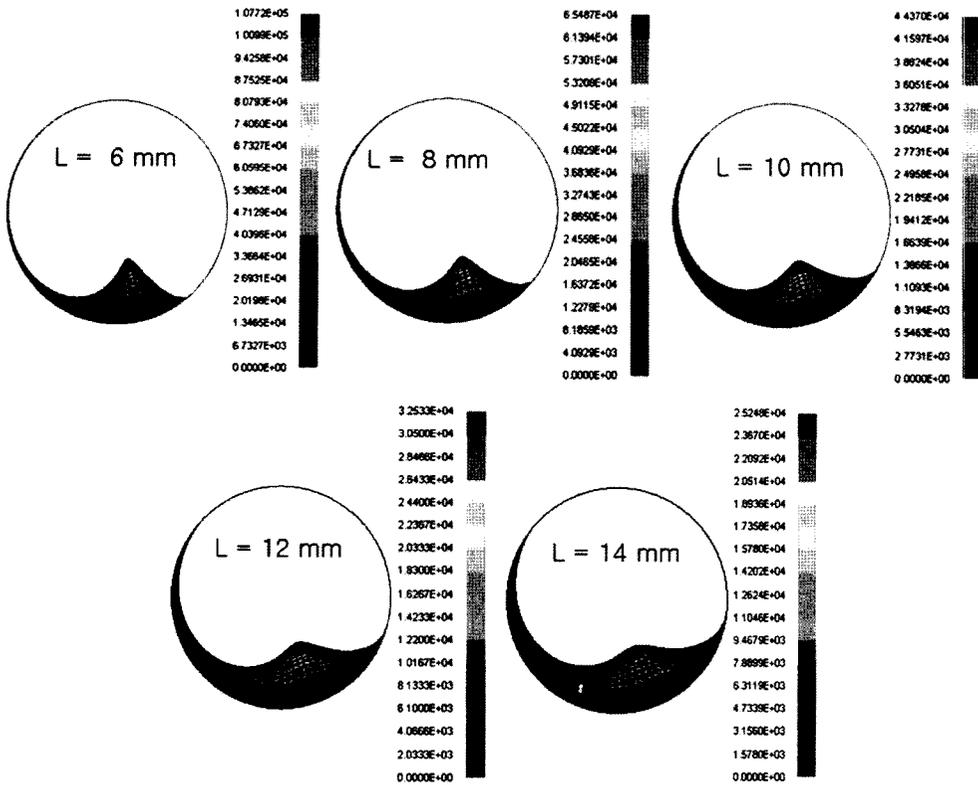


Fig. 7. Generated pressure profiles at 2000 rpm of the plain journal bearing with  $C=10\ \mu\text{m}$  for 5 different length cases.

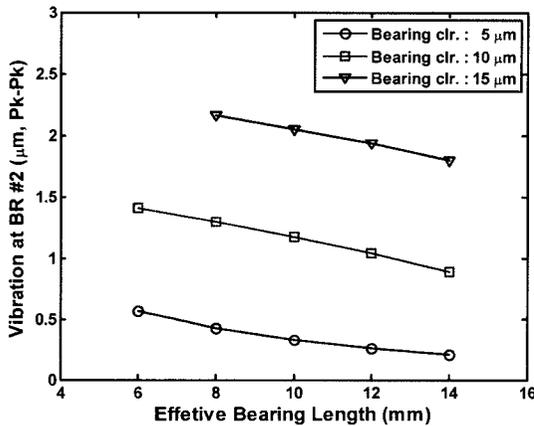


Fig. 8. Effects of plain journal bearing designs at 2000 rpm on the rotor vibration at bearing #2 position.

15  $\mu\text{m}$ 의 각각과 함께 길이  $L=6, 8, 10, 12, 14\ \text{mm}$ 의 설계를 조합하여 계산된 베어링들의 강성과 감쇠를 적용하여, 앞서와 동일한 조건에서 예측된 불균형 진동응답이 Fig. 8에 종합적으로 나타나 있다. 그림으로부터, 진동저감 능력 면에서, 베어링 틈새가 지배적인 설계인자로 작용하

여 틈새가 감소할수록, 즉,  $5 > 10 > 15\ \mu\text{m}$ 의 순서로 우수하고, 또한, 동일한 틈새의 경우 길이가 증가할수록, 즉,  $6 < 8 < 10 < 12 < 14\ \text{mm}$ 의 순서로 우수한 것으로 분석된다. 한편, Fig. 8에서  $C=15\ \mu\text{m}$ 과  $L=6\ \text{mm}$ 의 베어링 설계 조합에 대한 진동 예측이 빠진 것은 이 조합에서는 베어링 #2가 2000 rpm에서 부하를 지지하지 못하기, 즉, 저어널이 부상하지 못하기 때문이다.

이상의 결과로부터, 최종적으로, 베어링의 부하용량과 진동저감 능력 모두의 증대를 위해, 평 저어널 베어링이 3-축방향 저어널 베어링 설계보다 우수하며, 평 저어널 베어링의 설계에 있어 틈새는 감소시키는 한편, 길이는 증가시키는 설계가 최상으로 결론된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 LPG 자동차의 외장/수평방향 설치 LPG 로터리 메인 연료펌프에 적용을 위한 저어널 베어링의 설계 적합성 해석이 수행되었다. 해석에 고려된 베어링은 평 저어널과 3-축방향 홈 저어널 베어링

이었다. 베어링 윤활제로 사용되는 액체연료 LPG의 점성이 매우 낮아 베어링의 대표적 손상 모드가 베어링 메탈의 조기 마찰마멸 손상인 점을 반영하여, 설계 적합성의 평가에 사용된 베어링의 성능인자는 운전속도에 대한 부하용량과 베어링의 진동저감 능력이었다. 그리고 이때 베어링의 대표적 설계인자로는 반경틈새와 길이의 영향이 상세하게 해석되었다. 연구 결과, LPLi 펌프적용을 위한 부하용량과 진동저감 능력 모두에서, 평 저어널 베어링이 3-축방향 홈 저어널 베어링보다 우수한 설계이며, 아울러 평 저어널 베어링 중에서는 베어링의 반경틈새가 감소할수록 (즉,  $5 > 10 > 15 \mu\text{m}$ ) 그리고 베어링의 길이가 증가할수록 (즉,  $6 < 8 < 10 < 12 < 14 \text{ mm}$ ) 보다 우수한 설계인 것으로 밝혀졌다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 중소형 LPG상용차 기술 개발 사업의 지원 아래 이루어 졌으며, 이에 저자일동은 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Michael E. Payne, Jack S. Segal, Matthew Newkirk, and Lawrence R. Smith, 1995, "Use of butane as an alternative fuel emissions from a conversion vehicle using various blends", *SAE technical paper*, 952496, 1995.
2. Doo Sung 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. C. U. Kim, D. Y. Lee, S. M. Oh, K. Y. Kang, H. M. Choi, and K. D. 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. C. U. Kim, D. Y. Lee, S. M. Oh, and K. Y. Kang, "Durability Properties of Liquid Phase LPG Injection System with Various Qualities of LPG Fuels," *Transaction of KSAE*, Vol. 12, No. 5, pp.73-78, 2004.
6. An Sung Lee and Chang Up Kim, "Lubrication Characteristics of Spiral Groove Liquid Seals for Application to the Carrier of Vane-Type External LPG Fuel Pump," *Submitted for publication in the International Journal of Automotive Technology*, 2009.