

기하학적 형상 변경에 따른 플로팅 링 실의 특성 연구

The Characteristic of Floating Ring Seal with Modified Geometry Configuration

김경욱* · 김창호* · 하태웅** · 이용복†

Kyoung-wook Kim, Chang-Ho Kim, Tae-Wong Ha, Yong-Bok Lee

Key Words : Floating Ring Seal(플로팅 링 실), Eccentricity ratio(편심율), Whirl frequency ratio(휘둘림 주파수 비)
Friction force(마찰력), Stiffness coefficient(강성 계수)

ABSTRACT

The floating ring seal which is used in the high pressure turbo pump is frequently used in the oxidizer pump and the fuel pump of the turbo pump of the liquid propulsion rocket, because it is able to minimize clearance to decrease the leakage flow rate. But, floating ring seal has a tendency to increase the force which caused instability of system as the eccentricity ratio increases. In this paper, we devised design of floating ring seal which decrease contact area between floating and supporting ring. Modified floating ring seal has a tendency to decrease the eccentricity ratio compare with original floating ring seal. The whirl frequency ratio which is able to distinguish stability of system decrease compare with original floating ring seal

1. 서 론

액체 추진 로켓(LRE: Liquid Rocket Engine)에서 연소기에 추진제를 공급하기 위하여 사용되는 터보 펌프 unit은 Fig 1. 에서 나타낸 것처럼 두 개의 추진 펌프와 그것을 구동하기 위한 터빈으로 구성되는데 추진 펌프는 산화제 펌프(oxidizer pump)와 연료를 공급하기 위한 연료 펌프(fuel pump)로 구성되며 터빈과 더불어 동일 축선상에 위치한다. 터보 펌프의 임펠러 입구 및 출구에서의 누설량을 최소화하기 위해 실을 사용하게 되는데 터보펌프는 고압 고속의 작동환경에서 구동되기 때문에 비접촉 실을 주로 사용하게 된다. 지금까지 사용된 비접촉 실에는 평면 실(plain seal), 래버린스 실(labyrinth seal), 댐퍼 실(damper seal) 그리고 플로팅 링 실(floating ring seal) 등이 주로 적용되어 왔다. 이러한 비접촉 실 중에서 플로팅 링 실은 작동환경에 따라서 최적의 편심

위치를 능동적으로 찾는다라는 장점 때문에 많은 연구가 이루어져왔다.

Mineo⁽¹⁾의 연구에서 실제 작동 조건하에서 실의 특성이 연구되었고, Mamoru⁽²⁾에 의해서 실 간극에서 극저온 매질의 상변화에 따른 누설량의 변화에 대한 연구가 진행되었다. Ha⁽³⁾에 의해서 플로팅 링 실의 기하학적 조건과 작동 조건들이 변경되어 누설 특성과 회전체 동역학적 특성이 해석되었고, Allaire⁽⁴⁾등에 의해서 마찰 계수와 편심율의 변화에 따른 실의 동특성의 변화에 대한 연구가 진행되었다. Lee⁽⁵⁾에 의해서는 실의 누설 특성을 향상시키기 위하여 플로팅 링 실과 댐퍼실의 조합인 댐퍼 플로팅 링 실(Damper Floating Ring Seal)에 대한 연구가 이루어 졌다. 또한 Lee⁽⁶⁾는 실의 기하학적인 형상의 변화에 따른 실의 누설특성과 안정성의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 비접촉 실에 대한 연구는 주로 실의 기하학적 형상(geometry configuration) 변화를 통하여 성능을 개선시키는 방향으로 전개되었는데 Lee의 연구 내용을 살펴보면 플로팅 링 실의 편심율이 증가함에 따라 시스템의 불안정성을 야기시키는 연성 강성 계수가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 본 논문에서는 플로팅 링 실의 편심율이 감소할 수 있는 플로팅 링 실의 설계를 변경하였다. 그리고 수정된 플로팅 링 실을 실험을 통하여 정특성과 동특성을 추출하였고, 휘둘림 주파수 비를 이용하여 플로팅 링 실의 안정성을 판별하였다.

† 한국과학기술연구원 트라이볼로지센터
E-mail : lyb@kist.re.kr
Tel: (02) 958-5663, Fax: (02) 958-5669

* 한국과학기술연구원 트라이볼로지센터

** 경원대학교 건축설비·기계공학부

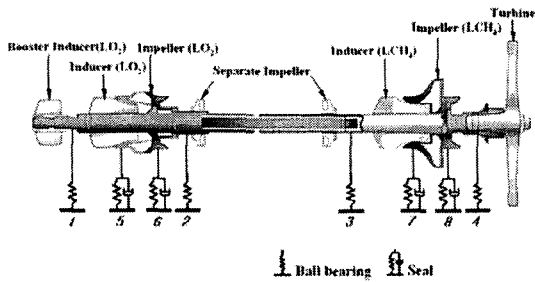


Fig. 1 Turbo pump unit in liquid rocket engine

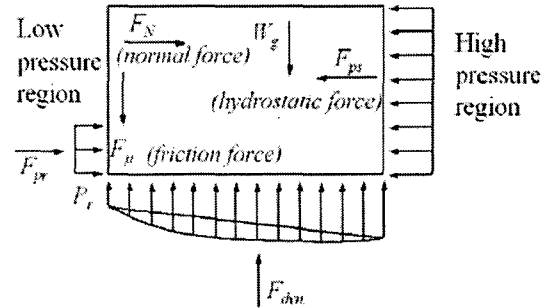


Fig. 3 FBD of floating ring seal

2. 플로팅 링 실의 특성

2.1 플로팅 링 실의 구동

플로팅 링 실은 Fig. 2와 같이 지지 링(supporting ring), 클램핑 너트(clamping nut) 그리고 플로팅 링(floating ring)으로 구성되어 있다. 플로팅 링은 터보펌프가 구동하기 전에는 실에 자중(weight, W)만이 작용하여 축과 최대 편심을 유지하고 있다가 펌프가 구동하면 축 방향으로 작용하는 정수 압력에 의하여 지지 링(supporting ring)으로 밀착하게 된다. 또한 지지 링과 플로팅 링 사이에는 마찰력(F_μ)이 작용하며 동시에 축과의 간극에서는 유체력(F_{dyn})이 발생하게 된다. 결국에는 식 (1)과 같이 실에 작용하는 힘들이 평형(equilibrium)을 이루는 위치에 정지하여 임의의 편심을 갖는 평실과 동일하게 작동한다. 플로팅 링에 작용하는 힘들을 Fig. 3에 나타내었다. 이러한 플로팅 링은 다른 비접촉 실들과 다르게 스테이터(stator)에 고정되어 있지 않고 작동 조건에 따라 그 고정 위치를 변경하게 된다. 플로팅 링이 정지하는 위치는 고정 위치(lock-up라고 부르는데 작동 압력 및 축의 회전 속도와 함께 플로팅 링과 지지 링의 마찰력 등 플로팅 링 실의 기하학적 형상이 고정 위치를 결정짓는 중요한 요소가 된다.

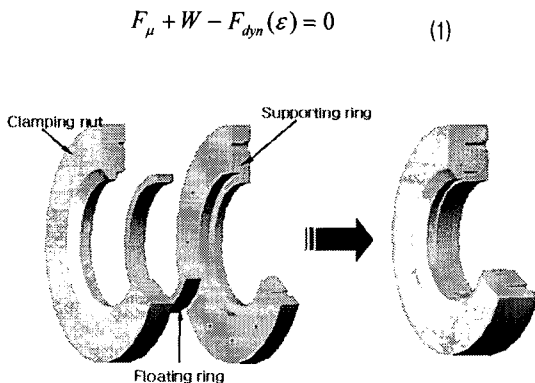


Fig. 2 Construction of floating ring seal

2.2 플로팅 링 실의 수정 형상

플로팅 링 실의 편심율은 식 (1)에서와 같이 플로팅 링의 자중과 플로팅 링과 축의 간극에서 발생하는 유체력 그리고 플로팅 링과 지지 링의 접촉면에서 발생하는 마찰력에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 플로팅 링과 지지 링에서 발생하는 마찰력을 감소시키기 위하여 Fig. 4에서 보는 것과 같이 플로팅 링과 지지 링이 접촉하는 면을 가공하여 접촉하는 면적을 감소시켰다. 기존의 플로팅 링 실의 기하학적 형상과 수정된 플로팅 링 실의 형상에 대한 자료는 Table. 1에 나타내었다. 수정된 플로팅 링 실의 플로팅 링과 지지 링의 접촉면을 1.5mm로 감소하여 접촉 면적이 기존의 플로팅 링 실에 비하여 약 57% 정도 감소하도록 설계하였다. 수정된 플로팅 링 실에 작용하는 힘들은 Fig. 5에 나타내었다. 플로팅 링의 지지링과 접촉하는 면에서 A영역에서 고압이 작용하게 된다. 따라서 이 영역에서 발생하는 힘과 고압을 받는 플로팅 링의 우측면의 힘이 상쇄되어 플로팅 링에 작용하는 수직항력(F_N)이 감소하고, 이에 따라 플로팅 링에 작용하는 마찰력이 감소하게 된다. 감소된 마찰력은 식 (1)에서 편심율이 감소되는 결과를 보여준다.

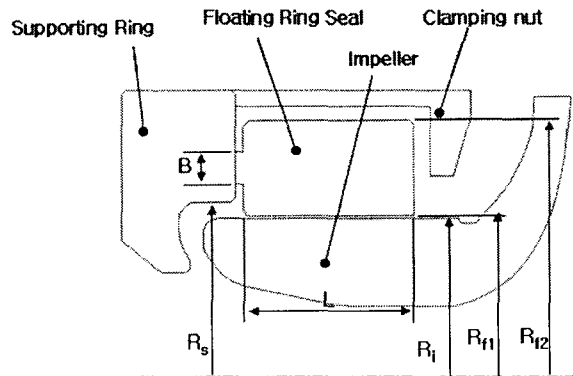


Fig. 4 Structural arrangement of Modified of floating ring seal

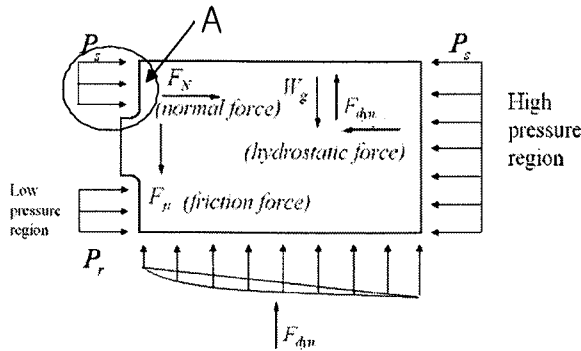


Fig. 5 FBD of Modified floating ring seal

Table. 1 Specification of floating ring seal

Parameter	Original floating ring seal	Modified floating ring seal
Radius of Impeller (Ri)	26.4	26.4
Inner Radius of Floating Ring (Rf1)	26.5	26.5
Clearance (Rf1-Ri)	0.1	0.1
Outer Radius of Floating Ring (Rf2)	31	31
Inner Radius of Support Ring (Rs)	27.5	27.5
Length of Floating Ring (L)	8.0	7.0
Width of Contact (B)	4.5	1.5

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 방법

플로팅 링 실의 정특성 및 회전체 동역학적 특성을 추출하기 위해 Fig. 6과 같은 실험 장치를 제작하였다.⁽⁷⁾ 축은 양단에 강성이 비교적 큰 볼베어링으로 지지되어 있으며, 스플라인 커플링(spline coupling)으로 연결된 모터로 구동하게 된다. 또한 실의 회전체 동역학적 계수들은 충격 실험(impact test)을 통해서 추출되었는데, 이를 위해서 실험장치의 하우징을 유연한(flexible) 구조로 설계하였다. 하우징과 지지부는 축의 고속 회전 시 유동의 회전에 의하여 발생하는 유체 휘돌림에 의한 불안정한 비틀림 등의 진동을 줄이기 위해 연성 바에 의하여 구속되어 있다. 플로팅 링 실은 축 중심에서 양쪽으로 대칭되게 되어 있다. 작동유체는 펌프에 의해 가압된 후 실험 장치의 중앙부로 유입되고 양측의 실을 통과하여 저장소로 돌아가게 된다. 또한 유입되는 유체의 유량을 측정하고자 유체의 유입 전단에 터빈 유량계를 설치하여 유입되는 유체의 양을 측정하였다. 실험에서 사용한 작동조건은 Table. 2 에 나타내었다.

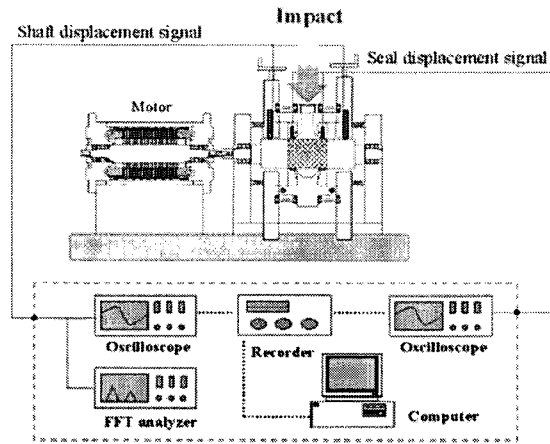


Fig. 6 Test facility of the floating ring seal

Table. 2 Operating Condition

Parameter	Value
Pressure Drop (MPa)	3.0, 5.0, 7.0
Rotor speed (RPM)	6200, 12400 18600, 24800
Fluid density (kg/m ³)	997.1
Fluid viscosity (N-s/m ²)	0.000894

3.2 회전체 동역학적 계수 추출

플로팅 링 실에서 발생하는 힘들은 일반적으로 2자유도를 갖는 선형시스템으로 간주되어 가진 되는 힘과 변위, 그리고 동역학적 계수들을 이용하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 이러한 식 (3)을 이산 푸리에 방법을 통하여 주파수 영역으로의 변환을 수행하면 식 (3)와 같이 H(ω)를 포함한 식으로 나타낼 수 있다. 그리고 식 (3)를 식 (4)과 같이 각 방향으로 다시 그룹(group)화하고 역을 취하면 식 (5)를 얻을 수 있다. 그런데 여기서 H(ω)는 주파수에 대한 2차 함수이기 때문에 각 자유도 방향으로 3종류의 주파수로 가정을 하게 되면 동특성 계수인 강성 계수와 감쇠 계수를 추출할 수 있게 된다. Fig. 7에는 동특성 계수를 추출하는 과정을 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$H(\omega)X(\omega) = F(\omega) \quad (3)$$

$$H(\omega) = [-\omega^2 M + i\omega C + K]$$

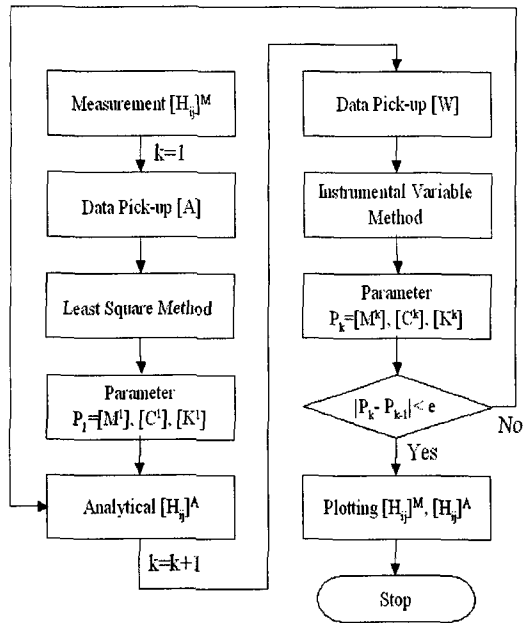


Fig. 7 Flow chart of parameter identification process

$$H(\omega)[X(\omega):Y(\omega)] = [F_x(\omega):F_y(\omega)] \quad (4)$$

$$H(\omega) = [F_x(\omega):F_y(\omega)][X(\omega):Y(\omega)]^{-1} \quad (5)$$

4. 실험결과

4.1 누설량 및 거동 특성

플로팅 링 실과 수정된 플로팅 링 실의 정특성을 비교한 결과는 Fig. 8 ~ Fig. 10 에서 확인할 수 있다. Fig. 8에서 수정된 플로팅 링 실의 누설량은 플로팅 링 실의 누설량에 비하여 소량 증가한 결과를 확인할 수 있다. 이것은 수정된 플로팅 링 실의 길이가 플로팅 링 실의 길이에 비하여 0.5mm 감소하였고, 길이의 감소로 인한 축 방향 유동에서 표면 마찰 면적의 감소로 누설량이 감소된 것으로 사료된다. 플로팅 링 실의 자세각에 대한 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 수정된 플로팅 링 실은 플로팅 링 실에 비하여 자세각이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 플로팅 링 실의 편심율은 Fig. 10에 나타내었다. 플로팅 링 실은 편심율이 0.66 ~ 0.79의 값을 갖는 반면에 수정된 플로팅 링 실은 0.61 ~ 0.69의 값을 보여 약 12.6%정도 감소하는 결과를 보였다. 편심율의 감소는 유체력에 의하여 실이 부상하여 축과 기하학적 중심이 일치되는 방향에서 고정되는 것을 의미한다. 특히 회전 속도의 증가에 따라 축과 실 사이의 틈새에서 동적 효과(hydrodynamic effect)가 발생하고 있음을 알 수 있다.

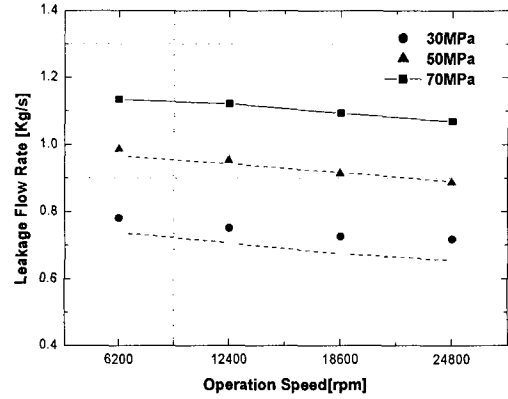


Fig. 8 Leakage flow rate of floating ring seal (solid : floating ring seal, dash modified floating ring seal)

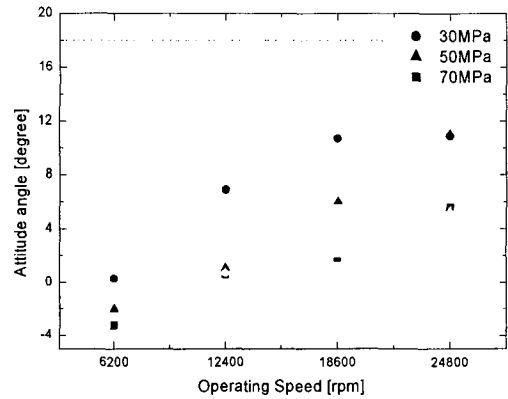


Fig. 9 Attitude angle of floating ring seal (solid : floating ring seal, dash : modified floating ring seal)

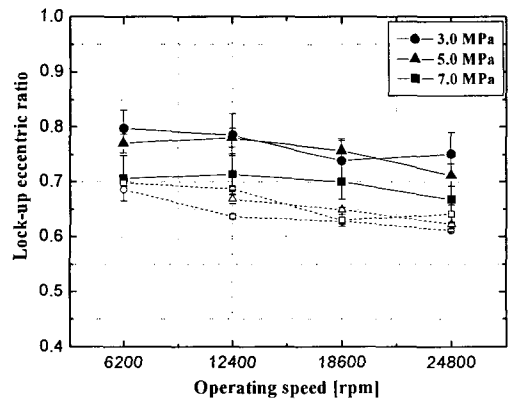
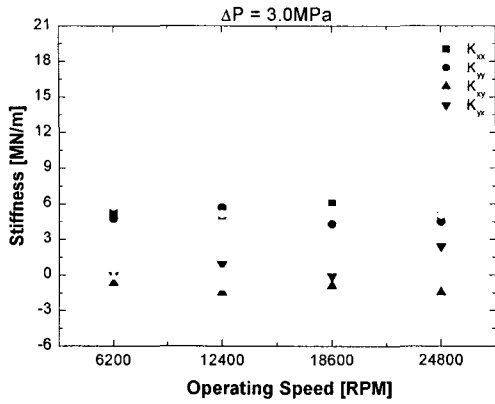
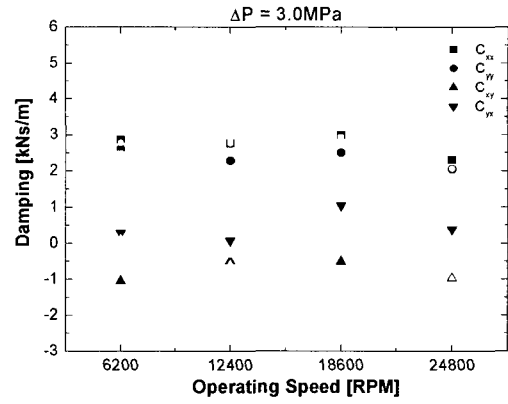


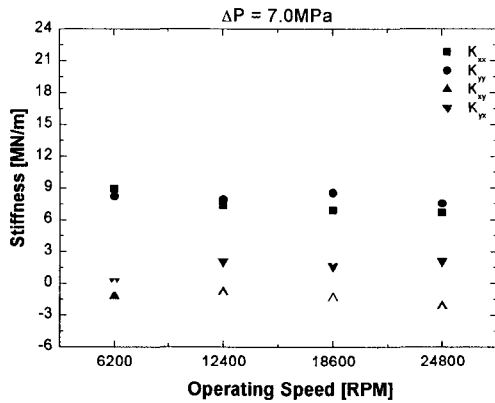
Fig. 10 Eccentricity ratio of floating ring seal (solid : floating ring seal, dash : modified floating ring seal)



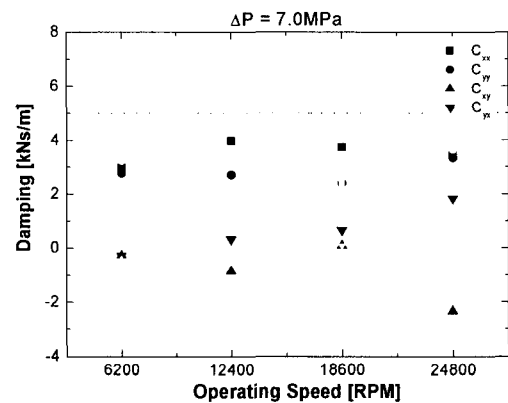
(a) 3.0 Mpa



(a) 3.0MPa



(b) 7.0Mpa



(b) 7.0MPa

Fig. 11 Stiffness coefficient of floating ring seal (solid : floating ring seal, line : modified floating ring seal)

Fig. 12 Damping coefficient of floating ring seal (solid : floating ring seal, dash : modified floating ring seal)

4.2 동특성 계수

플로팅 링 실의 동특성 계수는 Fig. 11와 Fig.12에 나타내었다. 플로팅 링 실의 강성계수에 대한 결과는 Fig. 11에서 확인 할 수 있다. 플로팅 링 실의 직접 강성 계수(direct stiffness coefficient)는 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 플로팅 링 실과 수정된 플로팅 링 실의 직접 강성 계수를 비교해 보면, 저압의 작동 환경에서는 플로팅 링 실과 수정된 플로팅 링 실의 강성계수가 거의 동일한 값을 나타내었다. 그러나 고압의 작동 영역에서는 수정된 플로팅 링 실의 직접 강성 계수가 플로팅 링 실에 비하여 50%이상 증가하는 경향을 보였다. 시스템의 불안정성을 야기시키는 연성 강성 계수는 플로팅 링 실과 수정된 플로팅 링 실이 거의 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 시스템의 안정성을 향상 시켜 주는 직접 감쇠 계수(direct damping coefficient)는 직접 강성 계수와 동일하게 압력 증가에 따라 증가하는 결과를 보였다. 감쇠 계수의 경우, 플로팅 링 실과 수정된 플

로팅 링 실의 경우 비슷한 경향을 보였다.

실의 안정성을 평가하는 정량적인 지표가 되는 등가 휘돌림 주파수 비(equivalent whirl frequency ratio)는 회전기 요소인 베어링과 실에서의 불안정성을 야기하는 힘과 안정화시키려는 힘의 비를 식 (6)과 식 (7)과 같이 표현한 것이다.⁽⁹⁾

$$WFR = \sqrt{\frac{(K_{eq} - K_{xx})(K_{eq} - K_{yy}) - K_{xy}K_{yx}}{(C_{xx}C_{yy} - C_{xy}C_{yx}) \Omega^2}} \quad (6)$$

$$K_{eq} = \frac{K_{xx}C_{xx} + K_{yy}C_{yy} - C_{xy}K_{yx} - C_{yx}K_{xy}}{C_{xx} + C_{yy}} \quad (7)$$

휘돌림 주파수 비에 대한 실험 결과는 Fig. 13에 나타내었다. 저속의 경우에는 수정된 플로팅 링 실의 휘돌림 주파수비가 플로팅 링 실에 비하여 증가된 경향을 보였다. 그러나 회전속도가 증가함에 따라 수정된 플로팅 링 실은 휘돌림 주파수비가 감소하는 경향을 보였다. 휘돌림 주파수 비의 감소는 회전요소로서의 플로팅 링 실이

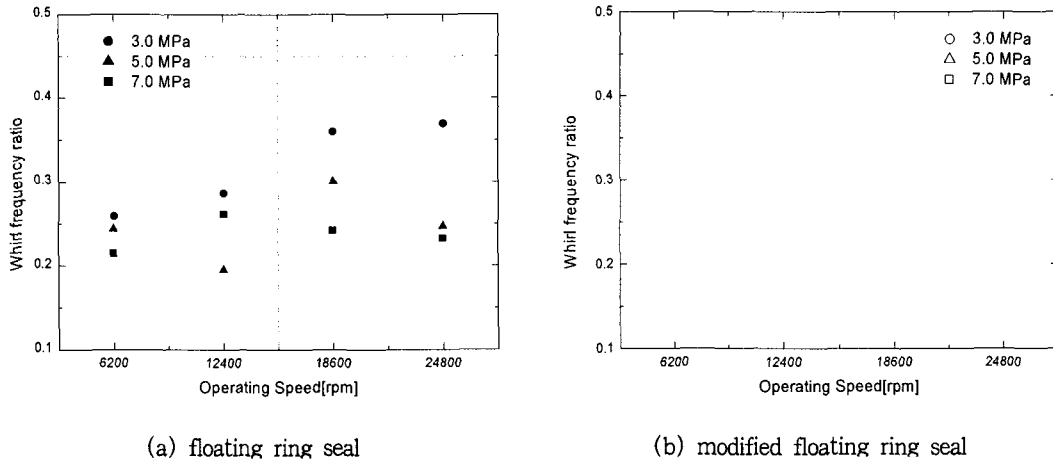


Fig. 13 Whirl frequency ratio of floating ring seal

보다 안정적으로 작동 할 수 있음을 의미한다. 이것은 수정된 플로팅 링 실의 경우 직접 강성계수가 플로팅 링 실에 비하여 약 1.5배 증가하였으나, 연성 강성 계수의 변화량이 미비하여, 시스템의 불안정성을 야기시키는 힘이 감소되는 결과로 나타내어 진 것으로 판단되어진다.

5. 결론

본 연구에서는 플로팅 링 실의 안정성을 향상시키는 방안으로 플로팅 링과 지지 링의 접촉 면적이 감소된 수정된 형상의 플로팅 링 실을 제안하였다. 수정된 형상의 플로팅 링 실은 축 방향 유동에서 표면 마찰 면적이 감소되어 누설량이 소량 증가하는 경향을 보였으나, 플로팅 링과 지지 링의 접촉면에서 발생하는 마찰력이 감소하여 편심률이 기존의 플로팅 링 실에 비하여 약 12.6% 감소되는 결과를 확인하였다. 또한 기존의 플로팅 링 실에 비하여 직접 강성 계수가 약 1.5배 증가하는 결과를 실험을 통하여 확인하였다. 시스템의 안정성을 판별하는 휘들립 주파수 비는 기존의 플로팅 링 실이 저속의 작동 환경에서 0.21~0.26, 고속의 작동 환경에서 0.26~0.36의 값을 나타내어 고속으로 회전함에 따라 불안정성이 증가하는 경향을 보였다. 수정된 형상의 플로팅 링 실은 저속에서 0.2~0.37의 값을 나타내어 기존의 실보다 안정성이 감소되었으나, 시스템이 고속으로 회전함에 따라 휘들립 주파수 비가 0.22~0.27의 값을 나타내어 고속의 작동 환경에서 안정성이 증가한 경향을 보였다. 향후에는 접촉면적을 변화량에 따른 플로팅 링 실의 성능 평가를 통하여 각 터보펌프에서 요구되는 성능을 만족할 수 있는 플로팅 링 실에 대한 자료 구축이 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 “KSLV 1단용 엔진 터보펌프의 베어링 및 실 신뢰성 해석 및 시험 평가”와 한국 과학기술 연구원 기관 고유 사업 “지능형 트리보 센서/액추에이터 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Mineo, S., Masataka, N., Kenjiro, K., and Masataka, K., 1986, "Research and Development of a Rotating-Shaft Seal for a Liquid Hydrogen Turbopump", *Lubrication Engineering*, Vol. 42, No. 3, pp. 162-169.
- (2) Mamoru, O., Masataka, N., Masataka, K., and Satoshi, H., 1999, "Two-Phase Flow in Floating-Ring Seals for Cryogenic Turbopumps", *STLE Tribology Transactions*, Vol. 42, No. 2, pp. 273-281.
- (3) Ha, T.W., Lee, Y. B., and Kim, C. H., 2002, "Leakage and Rotordynamic Analysis of a High Pressure Floating Ring Seal in Turbo Pump Unit of a Liquid Rocket Engine", *Tribology International*, Vol. 35, pp. 153-161.
- (4) Allaire, P., Lee, C., and Gunter, E., 1978, "Dynamics of Short Eccentric Plain Seals with High Axial Reynolds Numbers", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 15, No. 6, pp. 341-347.
- (5) Lee, Y. B., Shin, S. K., Ryn, K., Kim, C. H., Jang, Gunhee, 2004, "Test Results for Leakage and Rotordynamic Coefficients of Floating Ring Seal in a

High Pressure, High Speed Turbopump", ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Oct.

(6) 안경민, 이용복, 김창호, 하태웅, 2004, "플로팅 링 실의 누설 특성에 관한 실험적 연구", 윤활학회지, 제 20 권, 제 4호, pp. 183-189.

(7) Massmann, S., and Nordmann, R., 1985, "Some New Results Concerning the Dynamic Behavior of Annular Turbulent Seals," NASA CP 2409, Proceedings of the Workshop : Instability in Rotating Machinery held in Carson City, pp. 179-194.

(8) Fritzen, C. P., 1985, "Identification of Mass, Damping and Stiffness Matrix of Mechanical System," 10th ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise, Sept. 85, Cincinnati.

(9) Lund, J., 1965, "The stability of an Elastic Rotor in Journal Bearings with Flexible, Damped Supports", Journal of Applied Mechanics, pp. 991-920.