

플로팅 링 실의 누설 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Leakage Performance Characteristics of Floating Ring Seal

안경민* · 이용복† · 김창호* · 하태웅**

Kyoung-Min An, Yong-Bok Lee, Chang-Ho Kim and Tae-Woong Ha

Key Words : Turbo Pump(터보 펌프), Damper Floating Ring Seal(댐퍼 플로팅 링 실), Lock-up Position(고정 위치), Leakage(누설량), Clearance(간극)

ABSTRACT

The floating ring seal is used in an oxidizer and a fuel pump of the turbo pump unit in the liquid rocket engine to optimize a leakage without rubbing phenomenon. The damper floating ring seal, one of the floating ring seals, is with round hole pattern surfaces. It can reduce the leakage by increased friction factor that obtained from experimental data. In this paper, the leakage test about floating ring seal and damper floating ring seal was conducted. The test result showed the leakage performance of damper floating ring seal was better than the leakage performance of floating ring seal. With the leakage test the lock-up and rotation test about seal was conducted and that position is measured. The relatively large lock-up eccentric ratio was obtained from the test result of damping floating ring seal. The attitude angle of seal increases with increasing of shaft rotation

1. 서 론

액체 로켓 엔진(LRE: Liquid Rocket Engine)에서 연소기에 추진제를 공급하기 위해 사용되는 터보 펌프는 고압 산화제 펌프(HPOP: High Pressure Oxidizer Pump)와 고압 연료 펌프(HPFP: High Pressure Fuel Pump) 그리고 터빈으로 이루어져 있다. 이중에서 고압 산화제 펌프와 고압 연료펌프의 임펠러 입구부와 출구부에는 누설량을 최적화하고 마찰현상을 줄이기 위한 목적으로 비접촉실이 사용되어 왔다. 현재까지는 이러한 비접촉실로 평면 실(plain seal), 래버린스 실(labyrinth seal), 댐퍼 실(damper seal) 그리고 플로팅 링 실(floating ring seal) 등이 주로 적용되어 왔다.

비접촉실 중에서 플로팅 링 실은 작동환경에 따라서 최적의 편심위치를 능동적으로 찾는다는 장점 때문에 많은 연구가 이루어져왔다. 그 중에서 주요한 연구로는 실제 작동 조건하에서 실의 특성을 연구한 Mineo⁽¹⁾의 연구와 실 간극에서 극저온 매질의 상변화에 따른 누수량의 변화를 규명한

Mamoru⁽²⁾의 연구, 그리고 층류영역에서의 Reynolds방정식을 이용하여 해석을 수행하고, 플로팅 링 실의 동특성이 전체 펌프 시스템에 미치는 영향을 평가한 Kirk⁽³⁾의 연구와 액체 로켓 엔진의 터보펌프에 사용되는 플로팅 링 실의 특성을 해석한 Ha⁽⁴⁾등의 연구를 들 수가 있다. 이런 연구와 함께 플로팅의 누설량을 줄이기 위한 목적으로 댐퍼 플로팅 링 실이 고안되었다. 댐퍼형상을 가지는 실은 1982에 von Pragenou⁽⁵⁾에 의해 기존 실보다 안정성을 향상시키고 누설량을 줄일 목적으로 제안되었는데, Childs^(6,7)등은 실험과 해석을 통해서 댐퍼형상을 가지는 실을 연구하였다. 그 후에 댐퍼형상을 플로팅 링 실에 적용한 댐퍼 플로팅 링 실의 특성에 대한 해석도 이루어졌다.⁽⁸⁾ 그러나 플로팅 링 실 및 댐퍼 플로팅 실을 실제로 터보 펌프에 적용하기 위해서 필요한 실험은 아직 연구한 바가 미비한 실정이다. 이에 본 논문에서는 고압 터보펌프에 사용되는 플로팅 링 실과 댐퍼 플로팅 링 실의 누설량을 실험을 통하여 확인한 후 두 결과값을 비교하였다. 그리고 플로팅 링 실의 특성상 중요한 요소인 실의 고정 및 회전여부, 그리고 그 조건에서의 실의 위치를 누설량과 함께 실험을 통하여 측정하였다.

† 한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터
E-mail : lyb@kist.re.kr
Tel : (02) 938-5533, Fax : (02) 938-5539

* 한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

** 경원대학교 건축설비·기계공학부

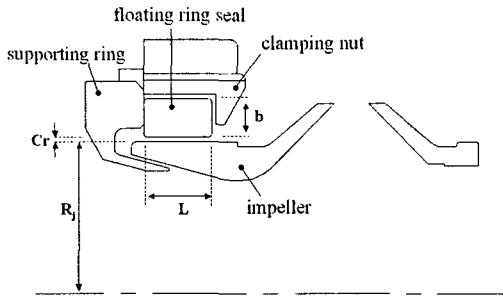


Fig. 1 Structural arrangement of floating ring seal

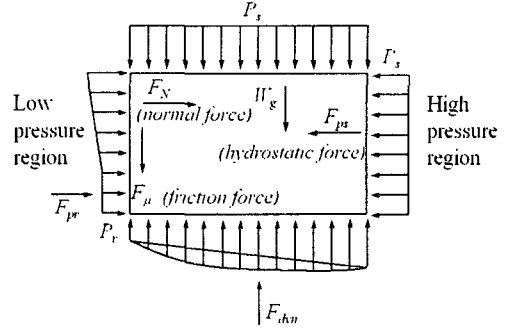


Fig. 3 FBD of floating ring seal

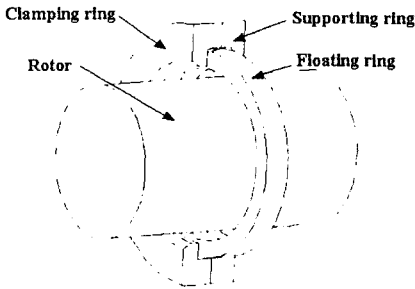


Fig. 2 Construction of floating ring seal

2. 플로팅 링 실의 특성

2.1 플로팅 링 실의 구조 및 특성

플로팅 링 실은 Fig. 1과 Fig. 2에서처럼 지지링 (supporting ring)과 축방향의 이동을 제한하는 고정 너트 (clamping nut)와 함께 임펠러 위에 위치한다. 플로팅 링 실은 임펠러 출구로부터 슈라우드를 따라 역류하는 누설량을 최소화 하기위해서 사용되는데, 펌프가 구동되기 전에는 자중에 의해서 최대편심위치에 있다가 구동되기 시작하면 Fig. 3처럼 실 주위에 발생하는 힘에 의해서 로터의 기하학적 중심을 향해 움직이게 된다. 구동 후 플로팅 링 실에 발생하는 힘으로는 고압 단에서 발생하는 정수압력 (hydrostatic force)과 정수압력에 의해 지지링에서 발생하는 수직력(normal force), 그리고 수직력(normal force)에 의해서 생기는 마찰력(friction force)과 로터의 회전에 의해서 실의 내면에 발생하는 유체력(hydrodynamic force)이 있다. 이런 힘에 의한 플로팅 링 실의 거동을 살펴보면, 우선 고압 단에서 발생하는 정수압력에 의해서 플로팅 링 실은 지지링에 밀착하게 된다. 그 후 지지링과 실 사이의 마찰

력과 실 간극에서 발생하는 유체력, 그리고 실의 자중에 의해서 실은 이동하게 되고, 세 힘이 평형을 이루는 곳에 도달하면 정지하게 된다. 정지한 플로팅 링 실의 위치를 고정 위치(lock-up position)라 하며, 고정 위치에 있는 플로팅 링 실은 임의의 편심을 갖는 평면 실과 동일하게 해석된다. 이처럼 작동환경에 따라서 능동적으로 움직이게 되는 플로팅 링 실은 로터의 진동과 무관하게 일정한 위치에 고정되어 있지 않고 항상 최적의 간극을 유지하는 위치에 있으므로 로터와의 접촉 현상으로 인한 마모를 최소화할 수가 있다.

2.2 실의 운동과 시스템의 불안정성

플로팅 링 실은 크게 3방향의 운동을 한다. 압력에 의한 축방향 운동, 유체력에 의한 반경방향 운동, 그리고 유체와 마찰에 의한 원주방향의 운동이 그것이다. 그런데 실의 운동은 시스템에 불안정성을 일으키는 원인중 하나이므로, 플로팅 링 실의 고정여부는 시스템의 안정성을 판별하기 위한 중요한 성분중 하나이다. 이러한 플로팅 링 실의 운동 중에서 축방향 운동은 플로팅 링 실에 압력이 가해지면 지지링에 고정되기 때문에 플로팅 링 실을 연구하는데 크게 고려되지 않는 반면, 반경방향운동이나 원주방향 운동은 실과 시스템의 특성에 의존하기 때문에 중요하게 고려된다.

2.3 댐퍼 플로팅 링 실

플로팅 링 실의 내면에 댐퍼 형상을 준 댐퍼 플로팅 링 실은 유체와 실과의 마찰계수를 증가시켜서 플로팅 링 실보다 향상된 누설 특성을 보여 준다. 실험 시편을 이용하여 표면 거칠기에 따른 점성 마찰특성을 실험한 연구 결과를 보면, 표면이 거칠수록 마찰 계수가 증가한다는 것을 알 수가 있다.⁽⁹⁾ 본 논문에서는 표면의 거칠기와 마찰특성에 대한 기존의 연구결과를 참고로 하였다.^(6,7,9) 일반적으로 댐퍼 형상을 가지는 실은 식 (1)과 같이 실의 내면 면적에 대한 댐퍼

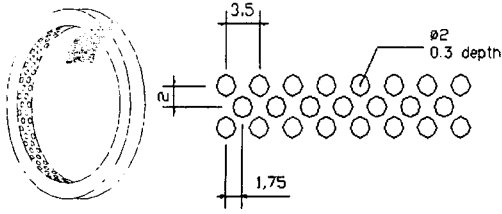


Fig. 4 Damper floating ring seal

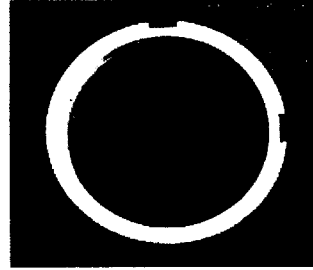


Fig. 6 Test rig for rotation test

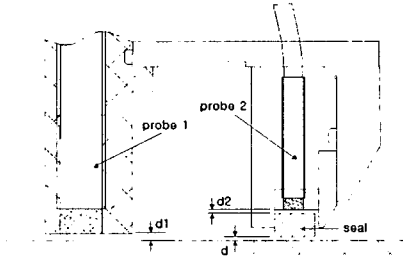


Fig. 5 Measuring the lock-up position

형상의 면적 비(γ)를 사용하여 댐퍼형상의 정도를 나타낸다. 이번 실험에서는 원형 단면 구멍을 가지는 댐퍼 형상을 실험장치의 안정성을 고려해서 면적비가 34%가 되도록 가공하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 댐퍼 플로팅 링 실의 내면을 보여준다.

$$\gamma = \frac{\text{hole-pattern surface area}}{\text{stator surface area}} \quad (1)$$

3. 실험 방법

3.1 플로팅 실의 고정 및 회전 여부

플로팅 링 실이 반경 방향으로 고정이 되는지를 알아보기 위해서 Fig. 5와 같이 변위센서를 장착하였다. probe1은 하우징과 축과의 상대변위, 그리고 probe 2는 하우징과 실과의 상대변위를 측정하게 된다. 실험은 하우징에 충격신호를 주어 probe 1과 probe 2에서 나오는 신호를 비교하여 이루어졌다. Fig. 6은 실의 원주방향 운동을 확인하기 위해서 가공된 실이다. 실 외경에 실의 간극보다 큰 홈을 90°간격으로 2개를 만들었으며, 원주방향운동을 확인하기 위해 probe2에서 나오는 신호를 사용하였다.

3.2 고정 위치 측정

실의 고정위치 측정을 위해서 Fig. 7과 같이 로터에 서로

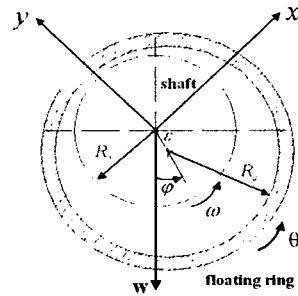


Fig. 7 Coordinate of floating ring seal

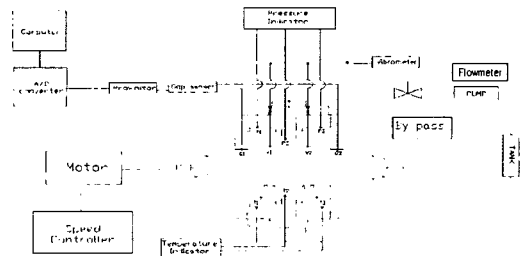


Fig. 8 Schematic of test facility

직교하는 x, y좌표계를 설정하였다. 각 좌표축에는 변위센서를 장착하여 실의 이동거리를 측정하였다. 플로팅 링 실의 특성상 실은 초기에 연직 하중방향으로 최대 편심률을 유지하면서 로터에 닿아있게 된다. 따라서 초기위치와 변위센서로부터 측정된 이동거리를 이용하여 실의 최종위치를 확인하고, 그 값을 편심률과 자세각을 이용하여 나타낼 수 있다. 편심률은 초기 간극에 대한 실 중심의 이동거리 비이고, 자세각은 연직 하중방향으로부터 시계 반대방향을 기준으로 했을 때 실의 중심이 이동한 각도이다.

3.3 누설 특성 측정

플로팅 링 실의 누설 특성을 측정하기 위해서 Fig. 8과 같은 실험 장치를 구성하였다. 탱크에 저장되어 있던 유체는

Table 1 Specification of floating ring seal

Geometry of floating ring seal	Test Value
Inner radius of seal (R_s ; mm)	26.5
Length of seal (L ; mm)	8
Height of seal (b ; mm)	4.5
Nominal clearance (C_r ; mm)	0.1
C_r/R	0.0038
L/D	0.1509

Operating condition

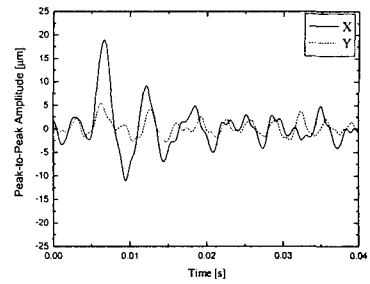
Pressure difference (P_f ; MPa)	3.0, 5.0, 7.0
Rotor speed (ω ; RPM)	6200, 12400 18600, 24800
Fluid density (ρ ; kg/m ³)	997.1
Fluid viscosity (μ ; N-s/m ²)	0.000894

펌프에 의해서 가압이 되고, 가압된 유체는 하우징을 지나서 실을 통과하게 된다. 실을 통과한 유체는 다시 탱크로 들어가서 순환하게 된다. 유량계는 펌프와 하우징 사이에 위치한다. 실의 누설량이 곧 순환하는 유체의 양이므로 유량계에서 측정된 값이 실의 누설량이 된다. 실험을 위해서 2개의 실이 사용되었으며 작동유체로는 물을 사용하였다. Table 1은 사용한 실의 기하학적인 조건 및 작동 환경을 나타내고 있다.

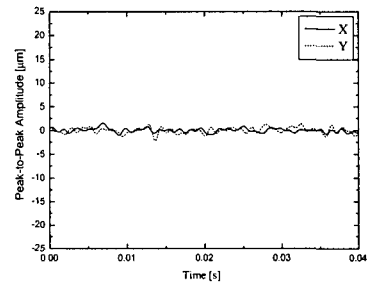
4. 플로팅 링 실의 실험 결과

4.1 실의 고정과 회전 여부 확인

플로팅 링 실이 고정위치에 있게 된다면 하우징에 충격 신호를 주었을 때 실과 하우징과의 상대변위는 존재하지 않게 된다. Fig. 10(a)는 하우징에 충격신호를 주었을 때 축과 하우징과의 상대변위를, Fig. 10(b)는 그때의 하우징과 실과의 상대변위를 보여준다. 충격 신호를 주었을 때 하우징과 축 사이에서는 큰 진폭을 갖는 상대변위가 발생한 반면, 하우징과 실 사이에서는 상대변위가 거의 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다. 이것은 하우징과 실이 서로 고정되어 충격 신호에 의해서 같이 진동 하였다고 볼 수 있다. 즉, 실이 고정되었다는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 실의 회전여부를 보여준다. A구간에서는 실에 90°간격으로 외경에 파여져 있는 홈 신호를 확인 할 수 있지만 B구간에서는 확인할 수 없다.



(a) Displacement signal between housing and shaft



(b) Displacement signal between housing and seal

Fig. 10 Impulse response

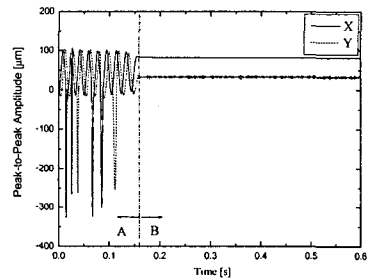
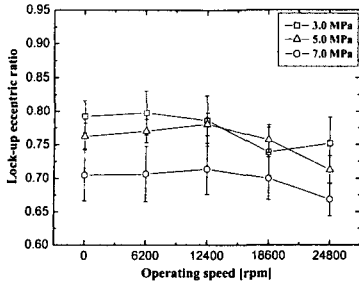


Fig. 11 Signal of a seal rotation

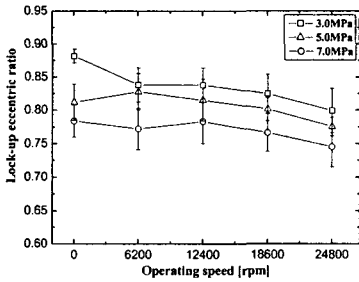
이것으로부터 실험장치의 구동 초기에는 유체에 의해서 축의 회전력이 플로팅 링 실에 전달되어 실이 회전하였지만, 구동 시간이 경과한 후 유체에 의한 실의 회전력이 실과 지지링 사이의 마찰력과 균형을 이루게 되면 실은 더 이상 회전하지 않는다는 것을 알 수 있다.

4.2 자세각과 편심률

플로팅 링 실은 평면 실처럼 고정되어 있지 않고 작동 조

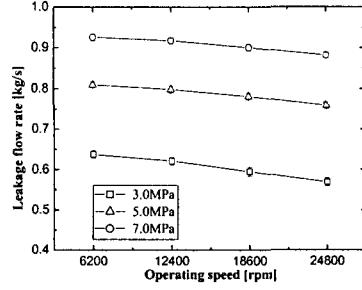


(a) Floating ring seal

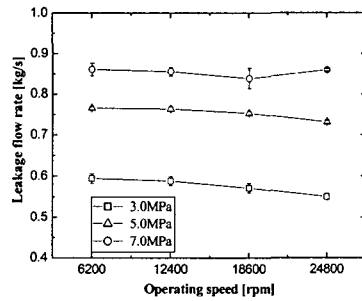


(b) Damper floating ring seal

Fig. 12 Eccentric ratio

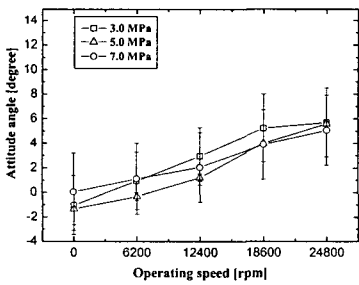


(a) Floating ring seal

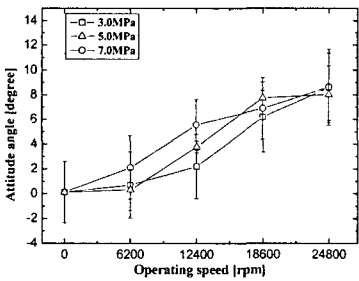


(b) Damper floating ring seal

Fig. 14 Leakage flowrate



(a) Floating ring seal



(b) Damper floating ring seal

Fig. 13 Attitude angle

건에 따라 고정위치를 바꾸기 때문에 플로팅 링 실의 현재 위치를 알아내는 것이 중요하다. Fig. 12와 Fig. 13은 플로팅 링 실의 편심률과 자세각을 보여준다. 편심률은 로터의 회전속도가 증가함에 따라 감소하였는데, 그 원인은 증가한 로터의 회전속도에 의해서 실 간극 내의 유체력이 증가하고 그 결과로 플로팅 링 실이 부상한 것으로 사료된다. 부상정도는 댐퍼 플로팅 링 실의 경우에 더 적었는데, 이는 실 내면의 댐퍼형상에 의한 결과로 보인다. 또한 로터의 회전속도의 증가는 실과 유체와의 마찰력을 증가시켜서 실의 자세각이 증가되는 결과를 초래했다.

4.3 실의 누설 특성

Fig. 14는 플로팅 링 실과 댐퍼 플로팅 링 실의 누설량을 나타낸다. 누설량은 두 경우 모두 압력의 증가에 따라서는 증가하고, 로터의 회전속도가 증가할 때는 감소하였다. 최대 누설량은 7.0MPa과 6200rpm에서 발생을 하였는데, 이때 플로팅 링 실의 누설량은 0.93kg/s, 그리고 댐퍼 플로팅 링 실의 누설량은 0.86kg/s으로 댐퍼 플로팅 링 실에서 약 7.5%적게 나왔다. 그것은 실 내면의 표면 조도에 따른 것으로 조도가 증가할수록 유체와의 마찰계수가 증가하여 누설량을 줄인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 플로팅 링 실과 댐퍼 플로팅 링 실의 고정 및 회전여부와 그때의 자세각과 편심률, 그리고 누설량을 측정하는 실험을 통하여 실의 거동 및 누설 특성에 대해서 연구하였다.

실험결과로부터 플로팅 링 실이 간극 내에서의 유체력과 지지링 사이에서의 마찰력, 그리고 실의 자중이 평형을 이루는 지점에서 고정이 되고, 또한 유체에 의해 전달되는 축의 회전력이 지지링과의 마찰력과 평형을 이루어 회전이 안 되었다는 것을 알 수 있었다. 고정위치에서의 편심률은 플로팅 링 실에 비해 댐퍼 플로팅 링 실이 더 큰 값을 가졌고, 자세각은 모든 실에서 축의 회전이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

누설량 실험에서는 가장 많은 누설량이 나타나는 7.0MPa, 6200rpm 조건에서 댐퍼 플로팅 링의 누설량이 플로팅 링 실의 누설량 보다 약 7.5%적게 나타나는 결과를 보였다.

고정위치에서의 편심률과 누설량의 실험결과를 종합적으로 고려하였을 때, 댐퍼플로팅 링 실에서는 누설량이 적어지면서 부상력이 감소하여 실이 큰 편심률을 가진 것으로 판단된다. 이러한 큰 편심률은 실의 불안정성을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있으므로 향후에는 실의 동특성 추출과 이를 통한 불안정성 판별 및 안정성 향상을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 “민군 겸용 기술 개발”사업의 세부 과제 인 “고압 터보 펌프 회전축 동특성 해석 및 Tribo 요소 설계 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Mineo, S., Masataka, N., Kenjiro, K., and Masataka, 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) Kirk, R. G., and Bahtei, S. K., 1999, "Evaluation of Floating Ring Seals for Centrifugal Compressors Using the Finite Element Method," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 121, pp. 131-136.
- (4) Tae-Woong Ha, Yong-Bok Lee, and Chang-Ho Kim, 2002, "Leakage and Rotordynamic Analysis of a High Pressure Floating Ring Seal in the Turbo Pump Unit of a Liquid Rocket Engine," Tribology International, Vol. 35, pp. 153-161.
- (5) von Pragenou, G., 1982, "Damping Seals for Turbomachinery," NASA Technical Paper No. 1987.
- (6) D. W. Childs, and Chang-Ho Kim, 1985, "Analysis and Testing for Rotordynamic Coefficients of Turbulent Annular Seals with Different, Directionally-Homogeneous Surface-Roughness Treatment for Rotor and Stator Elements," ASME Journal of Tribology, Vol. 107, No. 3, July 1985, pp. 296-306.
- (7) D. W. Childs, Chang-Ho Kim, 1986, "Test Results for Round-Hole-Pattern Damper Seal: Optimum Configurations and Dimensions for Maximum Net Damper," Journal of Tribology, Vol. 108, pp. 605-611.
- (8) 하태웅, 이용복, 김창호, 2003, "원형 단면 구멍 표면을 갖는 댐퍼 후로팅 링 실의 누설량 및 회전체 동역학적 특성 해석," Journal of the KSTLE, Vol. 19, No. 6, pp. 349-356.
- (9) 하태웅, 주영찬, 이용복, 김창호, 2003, "임의로 거칠게 한 표면의 점성 마찰특성," 유체기계저널, 제 6권, 제 3호, pp. 15-20.