

갤러킨 유한요소법을 이용한 미케니컬 페이스 시일의 윤희성능해석

최병렬 · 이안성* · 최동훈**

한양대학교 대학원 기계설계학과

*한국기계연구원

**한양대학교 기계공학부

Lubrication Analysis of Mechanical Face Seal using Galerkin Finite Element Method

Byung-Lyul Choi, An Sung Lee* and Dong-Hoon Choi**

Graduate School, Hanyang University

**Korea Institute of Machinery & Materials*

***School of Mechanical Engineering, Hanyang University*

Abstract—A mechanical face seal is a tribo-element intended to control the leakage of working fluid at the interface of a rotating shaft and its housing. The leakage of working fluid decreases as the seal surfaces get closer each other. But a very small seal clearance results in a drastic reduction of seal life because of high wear and heat generation. Therefore, in the design of mechanical face seals the compromise between low leakage and acceptable life is important and presents a difficult design problem. And the gap geometry of seal clearance affects seal performance very much and becomes an important design variable. In this study the Reynolds equation for the sealing dam of mechanical face seals is numerically analyzed using the Galerkin Finite Element Method, which can be readily applied to various seal geometries. The film pressures of the sealing dam are analyzed, including the effects of the seal face coning and tilt. Then, opening forces, restoring moments, leakages, and dynamic coefficients are calculated.

Keyword—mechanical face seal, FEM, dynamic characteristics, coning, tilt.

1. 서 론

미케니컬 페이스 시일(Mechanical face seal)은 워터펌프에서부터 로켓엔진 터보펌프에 이르기까지 회전하는 축을 통한 압력 유체의 밀봉을 위한 기계요소로 기계 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 미케니컬 페이스 시일의 가장 중요한 역할은 작동유체(Working fluid)의 누설을 방지하는 것으로 이는 시일의 표면들이 서로 아주 작은 틈새를 가질수록 감소하게 된다. 그러나 이를 위해 틈새를 감소시키면 표면사이의 열발생과 함께 마멸로 인해 시일 수명이 현저하게 감소한다. 그러므로 미케니컬 페이스 시일을 설계할 때에는 적은 누설량과 오랜 수명이라는 상반된 설계 목표의 적절한 타협점을 찾는 것이 중요하다. 특히 미케니컬 페이스 시일의 표면틈새형상은 성능에 관련된

중요한 설계변수가 되므로 이에 따른 성능 변화의 관찰이 필요하다.

미케니컬 페이스 시일은 Fig. 1 과 같이 프라이머리-링(Primary Ring), 메이팅-링(Mating Ring), 세컨더리-시일(Secondary Seal), 스프링(Spring), 포지티브-드라이브-메커니즘(Positive Drive Mechanism)으로 구성되며 프라이머리-링은 축 방향의 변위와 시일의 기울어짐을 허용하며 유연성을 가지고 설치된다.

지금까지 미케니컬 페이스 시일의 윤희 해석에는 유한차분법(FDM)과 시일의 폭이 원주에 비해 아주 작다는 가정(Narrow seal approximation)하에서 레이놀즈 방정식의 해석적 해를 구하는 방법이 이 주로 사용되었다. Etsion[1]은 미케니컬 페이스 시일의 원주방향 웨이비니스와 반경방향 코닝(Coning)을 고려하여 해석적 해를 구하였고, Etsion

과 Sharoni[2,3]는 시일의 기울어짐과 반경방향의 코닝을 고려하여 Hydrostatic 효과와 Hydrodynamic 효과에 따른 시일의 성능해석을 수행하였다. 또, Etsion[4]은 미케니컬 페이스 시일의 해석적 동특성계수를 구하였다. 본 연구에서는 비접촉식의 미케니컬 페이스 시일의 유효성능 및 동특성 해석을 위해, 시일표면의 다양한 틈새형상의 해석이 용이한 Galerkin 유한요소법(FEM)을 이용하여 레이놀즈 방정식의 정식화를 수행한다. 여기서 실링댐의 틈새는 시일의 기울어짐과 반경방향의 코닝을 고려하여 모델링된다. 시일의 내경과 외경간의 압력차가 충분하여 캐비테이션(Cavitation)이 일어나지 않는 시일의 개방력(Opening Force), 리스토링-모멘트(Restoring Moment), 트랜스버스-모멘트(Transverse Moment), 누설이 계산되고, 수치적 교란법을 이용하여 축방향과 시일의 기울어짐 방향의 강성계수(Stiffness coefficient)와 감쇠계수(Damping coefficient)가 구해진다. 한편, Narrow seal 가정에 의한 기존의 해석적 결과와 비교 검토가 수행된다.

2. 유효해석

2.1 유한요소 정식화

Fig. 2는 미케니컬 페이스 시일의 유효해석을 위한 원통좌표계를 나타내며, 무차원화된 레이놀즈 방정식은 식(1)로 표현된다.

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial R} \left(RH^3 \frac{\partial P}{\partial R} \right) = \Lambda R \frac{\partial H}{\partial \theta} + 2\Lambda R \frac{\partial H}{\partial \tau} \quad (1)$$

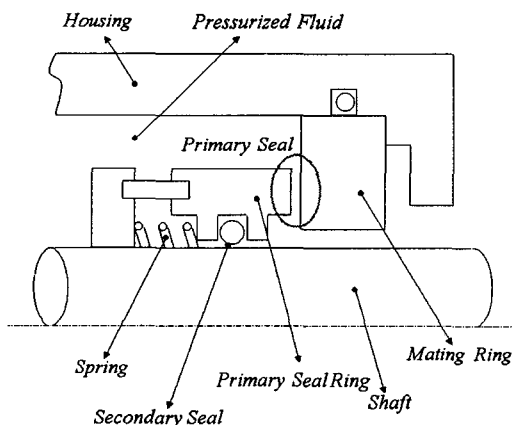


Fig. 1 Arrangement of seal components

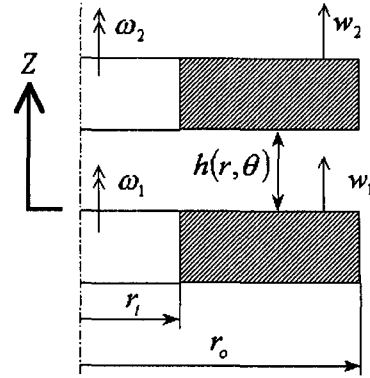


Fig. 2 Seal cylindrical coordinates

여기서 Seal parameter Λ 는 식(2)와 같다.

$$\Lambda = \frac{12\pi N\mu}{\Delta p^*} \left(\frac{r_o^*}{C^*} \right)^2 \quad (2)$$

식(1)을 Galerkin residual 방법으로 유한요소 정식화를 수행하면 식(3)이 된다.

$$\begin{aligned} [K^e] \{p^e\} &= \{r^e\} \\ K_{ij}^e &= \int_A \left\{ \frac{H^3}{R^2} \frac{\partial N_i}{\partial \theta} \frac{\partial N_j}{\partial \theta} + H^3 \frac{\partial N_i}{\partial R} \frac{\partial N_j}{\partial R} \right\} dA \\ r_i^e &= \Lambda \int_A \frac{\partial N_i}{\partial \theta} H dA - 2\Lambda \int_A N_i \frac{\partial H}{\partial \tau} dA \\ &+ \int_S N_i H^3 \frac{\partial P}{\partial R} l dS + \int_S N_i \left(\frac{H^3}{R} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \Lambda RH \right) m dS \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 성능 및 동특성 해석

Fig. 3은 미케니컬 페이스 시일 표면의 코닝, 시일의 기울어짐, 시일의 내경, 외경, 틈새를 보여준다. 시일의 기울어짐과 시일 표면의 코닝을 고려한 유막두께는 식(4)로 표현된다.

$$H = 1 + \gamma R \sin \theta + \beta (R - R_i) \quad (4)$$

여기서 무차원화된 축의 기울어짐과 코닝은 식(5)로 정의된다.

$$\gamma = \frac{\gamma^* r_o^*}{C^*}, \quad \beta = \frac{\beta^* r_o^*}{C^*} \quad (5)$$

위의 유막두께를 유한요소방정식에 대입하여 구한 유막의 압력으로부터 시일의 개방력, 리스토링-모멘트 그리고 트랜스버스-모멘트를 식(6)-(8)과 같이 계산할 수 있다.

$$F_z = \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^1 PR dR d\theta \quad (6)$$

$$M_x = \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^1 PR^2 \cos \theta dR d\theta \quad (7)$$

$$M_y = \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^1 PR^2 \sin \theta dR d\theta \quad (8)$$

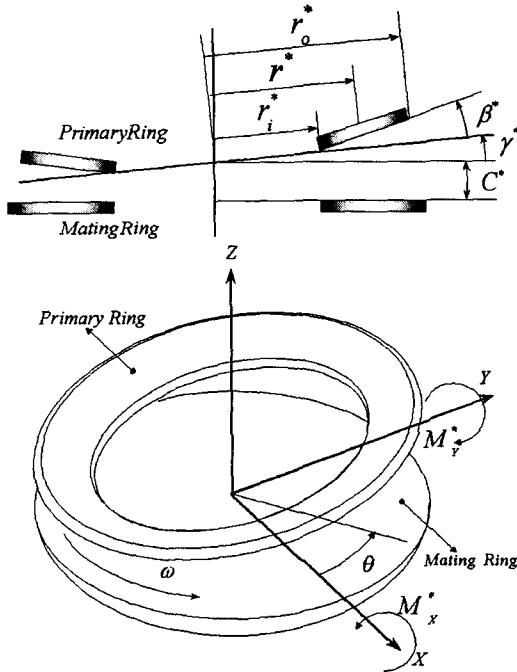


Fig. 3 Primary ring and mating ring with coordinates system

한편, 실링댐의 동특성 계수는 축 방향과 시일의 기울어짐 방향의 수치적 교란으로 식(9)-(12)와 같이 계산할 수 있다.

$$K_{zz} = -\frac{\partial F_z}{\partial Z} \quad (9)$$

$$K_{\eta\eta} = -\frac{\partial M_x}{\partial \gamma} \quad (10)$$

$$C_{zz} = -\frac{\partial F_z}{\partial Z} \quad (11)$$

$$C_{\eta\eta} = -\frac{\partial M_x}{\partial \gamma} \quad (12)$$

시일에서 반경방향 Coettete 유동은 없으므로 반경방향 단위길이당의 누설은 식(13)과 같이 표현된다.

$$q_r^* = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (13)$$

또, 누설은 경계선을 따라 나타나므로 이를 유한요소방정식과 연계하면 반경방향의 총누설은 식(14)와 같다.

$$Q_r^* = -\frac{C^* \Delta p}{12\mu} \sum_i \left(\sum_j K_{ij} p_j - r_i \right) \quad (14)$$

여기서, i 는 누설경계선상의 절점을 나타낸다.

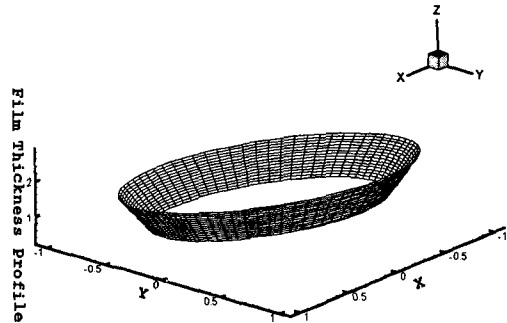


Fig. 4 Film thickness profile

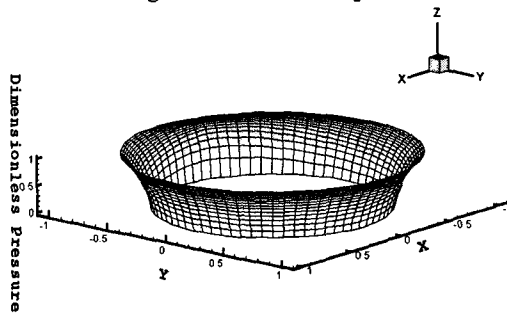


Fig. 5 Pressure distribution

3. 해석결과 및 고찰

3.1 성능해석결과

Fig. 4은 Table 1의 Data를 사용하여 시일표면의 코닝이 5, 시일의 기울어짐이 0.8일 때, 미케니컬 페이스 시일의 유막 두께 형상을 보여주고 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 표면형상에서 외경압력이 1 MPa이고, 내경압력이 0 MPa일때의 무차원화된 압력분포를 나타낸 것이다.

Fig. 6부터 Fig. 8까지는 반경비가 0.8일 때 시일 표면의 코닝에 따라 시일의 기울어짐이 각각 0.0, 0.4, 0.8일 때의 윤활성능계수

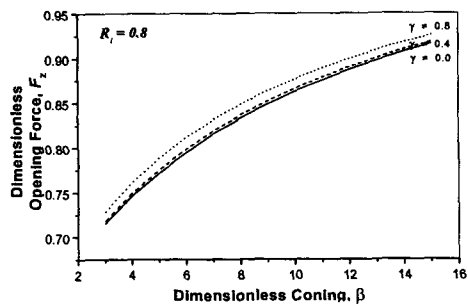


Fig. 6 Opening force Vs. coning for various tilts at $R_i = 0.8$

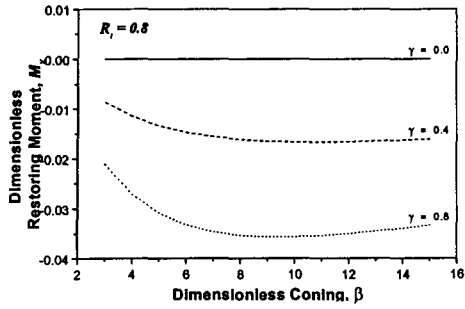


Fig. 7 Restoring moment Vs. coning for various tilts at $R_1 = 0.8$

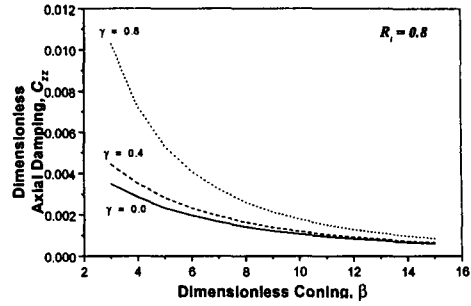


Fig. 11 Axial damping Vs. coning for various tilts at $R_1 = 0.8$

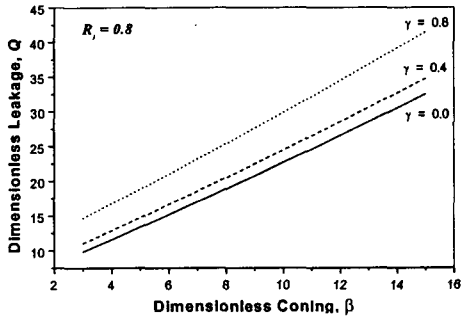


Fig. 8 Leakage Vs. coning for various tilts at $R_1 = 0.8$

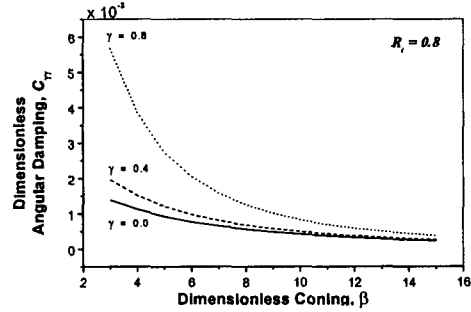


Fig. 12 Angular damping Vs. coning for various tilts at $R_1 = 0.8$

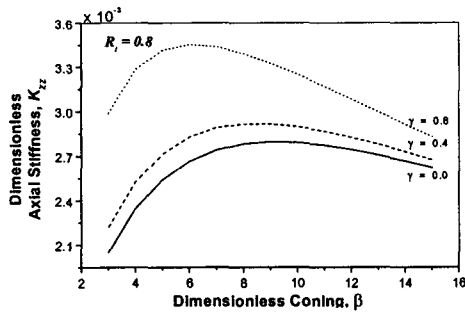


Fig. 9 Axial stiffness Vs. coning for various tilts at $R_1 = 0.8$

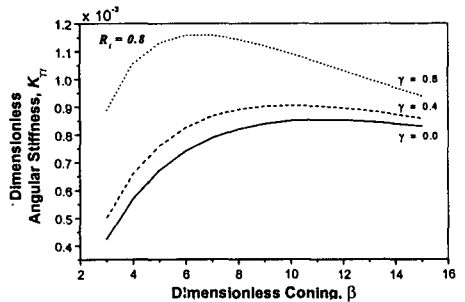


Fig. 10 Angular stiffness Vs. coning for various tilts at $R_1 = 0.8$

변화를 보여주고 있다. Fig. 6은 개방력의 변화를 보여주고 있는데, 코닝이 커질수록, 시일의 기울어짐이 증가할수록 증가하는 것을 보여주고 있다. Fig. 7은 리스토링-모멘트의 변화로 코닝이 커질수록 그 절대값이 증가하다가 최대치를 지나 감소하는 추세를 보인다. 또 시일의 기울어짐이 생기지 않는 경우에는 리스토링-모멘트는 발생하지 않는 것을 보여준다. Fig. 8는 누설의 경우 코닝과 시일의 기울어짐이 커질수록 커지는 것을 보여준다.

3.2 동특성 계수 해석 결과

Fig. 9부터 Fig. 12까지는 반경비가 0.8일 때 시일 표면의 코닝에 따라 시일의 기울어짐이 각각 0.0, 0.4, 0.8일 때의 동특성 계수 변화를 보여주고 있다. Fig. 9는 축방향 강성 계수의 변화를 보여주고, Fig. 10은 기울어짐 방향 강성계수의 변화를 보여준다. 두 강성 계수 모두 시일의 기울어짐이 증가할수록 증가하지만 코닝이 증가하면 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 이는 최적의 코닝값이 존재함을 의미한다. Fig. 11은 축방향 감쇠계수를 나타내고, Fig. 12는 기울어짐 방향 감쇠계수의 변화를 나타내는데 시일의 기울

어짐이 증가할수록 증가하나 코닝이 증가할수록 감소하는 것을 보여준다.

4. Narrow seal 해석적 결과와 비교 검토

4.1 윤활 성능의 비교

개발된 성능해석 프로그램은 Table 1의 데이터와 작동조건을 사용하였다. 이후로 사용되는 시일표면의 코닝과 시일의 기울어짐의 값들은 모두 무차원값을 사용하였다.

Table 1 Mechanical face seal dimension data and operating condition

Mechanical face seal dimension data & operating condition		
r_o^*	Seal outer radius	0.04 [m]
r_i^*/r_o^*	Radius ratio	0.8 / 0.98 [-]
C^*	Design clearance	1.0e-5 [m]
ω	Shaft speed	9550 [rpm]
p_o^*	Outside pressure	1.0e6 [Pa]
p_i^*	Inside pressure	0.0 [Pa]
μ	Viscosity (60°C Water)	5.0e-4 [Pa·s]

개방력, 리스토링-모멘트 그리고, 트랜스버스-모멘트의 비교를 위해 본 연구에서 구한 유한요소 수치적 결과와 Etsion과 Sharoni[2]가 제시한 Narrow seal 해석적 결과를 비교하였다. (단, Hydrodynamic effect 결과만을 비교하였음.) Fig. 13은 반경비가 0.8일 때 시일의 기울어짐에 따른 성능계수들의 변화를 보여주고 있고, 최대 차이는 6.20% 이하이다. Fig. 14는 코닝에 따른 성능계수들의 변화이고, 코닝은 커질수록 잘 일치하며 최대 차이는 8.60% 이하이다. Fig. 15는 반경비가 0.98일 때 시일의 기울어짐에 따른 성능계수들의 변화를 보여준다. 최대 차이는 7.50% 이하이다. Fig. 16은 반경비가 0.98일 때 코닝에 따른 성능계수들의 변화를 보여주고, 최대 차이는 9.10% 이하이다.

4.2 동특성 계수의 비교

한편, 시일의 동특성 계수의 비교 결과가 Table 2에 나타나 있다. A는 본 논문의 유한요소 수치적 결과를 나타내고, B는 Narrow seal 가정을 적용한 참고논문의 결과인데, 최대 차이는 반경비가 0.8일 경우, 8.34%를, 0.98일 경우, 0.64%를 보이고 있다.

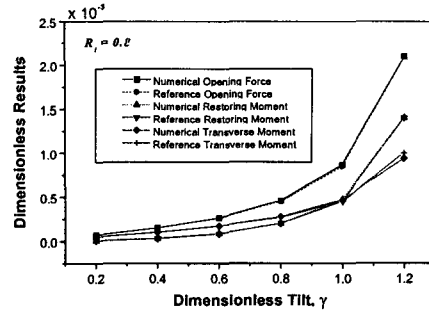


Fig. 13 Comparison of performances as a function of tilt for $R_i = 0.8$

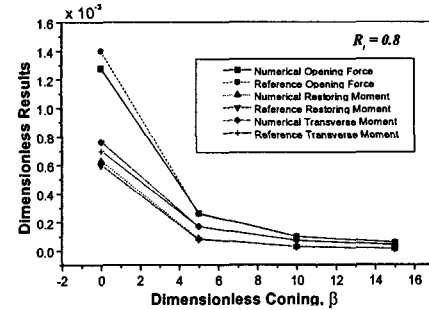


Fig. 14 Comparison of performances as a function of coning for $R_i = 0.8$

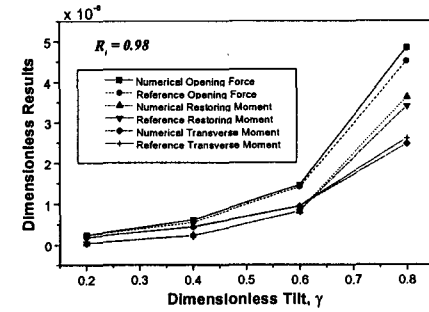


Fig. 15 Comparison of performances as a function of tilt for $R_i = 0.98$

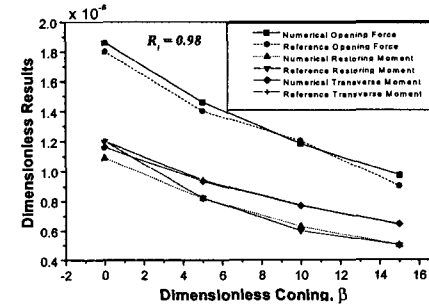


Fig. 16 Comparison of performances as a function of coning for $R_i = 0.98$

Table 2 Comparison of dynamic coefficients

R_i	0.8			0.98		
	A	B	Diff (%)	A	B	Diff (%)
K_{zz}	0.021	0.023	8.34	0.266	0.268	0.53
K_{η}	0.069	0.074	5.24	0.116	0.117	0.64
D_{zz}	0.010	0.011	8.19	0.016	0.016	0.57
D_{η}	0.027	0.028	3.77	0.007	0.007	0.64

5. 결 언

본 연구에서는 Galerkin 유한요소정식화를 이용하여 비접촉식 미케니컬 페이스 시일의 윤회해석 프로그램을 개발하였다. 코닝과 시일의 기울어짐에 따른 개방력, 리스토링-모멘트, 누설, 강성계수와 감쇠계수 계수들의 변화를 고찰하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 누설, 개방력은 코닝과 시일의 기울어짐이 증가할수록 증가하였다.
2. 강성계수와 리스토링-모멘트는 시일의 기울어짐이 증가할수록 증가하였고, 코닝이 증가할수록 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 이는 강성계수와 리스토링-모멘트의 경우 최적의 코닝값이 존재하는 것을 알 수 있다.
3. 감쇠계수는 코닝이 증가할수록 감소하였고, 시일의 기울어짐이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.
4. 미케니컬 페이스 시일의 성능에 영향을 주는 인자는 시일틈새, 코닝, 시일의 기울어짐, 반경비등이 있다.

한편, 유한요소 수치적 결과와 Narrow seal 해석적 결과를 비교한 결과, 실제적 시일의 반경비를 나타내는 $R_i = 0.8$ 에서, 각종 윤회 성능과 동특성 계수가 10%이내에서 일치함을 알 수 있었다. 따라서, 초기 기본 설계에서는 Narrow seal 해석 결과가 사용될 수 있으나, 상세설계에서는 유한요소법등에 의한 수치 해석 결과가 사용되어야 할 것으로 판단된다.

기 호 설 명

- Δp^* : pressure difference, Pa
- q_r^* : radial leakage per unit length, m^2/s
- C_{zz} : axial damping $(C_{zz}^* C^* \omega) / (\Delta p^* r_o^{*2})$

- C_{η} : angular damping $(C_{\eta}^* C^* \omega) / (\Delta p^* r_o^{*4})$
- F_z : opening force $F_z^* / (\Delta p^* r_o^{*2})$
- K_{zz} : axial stiffness $(K_{zz}^* C^*) / (\Delta p^* r_o^{*2})$
- K_{η} : angular stiffness $(K_{\eta}^* C^*) / (\Delta p^* r_o^{*4})$
- M_x : restoring moment $M_x^* / (\Delta p^* r_o^{*3})$
- M_y : transverse moment $M_y^* / (\Delta p^* r_o^{*3})$
- Q_r^* : total leakage, m^3/s
- β : coning parameter $(\beta^* r_o^*) / C^*$
- γ : tilt parameter $(\gamma^* r_o^*) / C^*$
- Λ : seal parameter $(12\pi N \mu r_o^{*2}) / (\Delta p^* C^{*2})$
- * : dimensional
- i : inner
- o : outer

참 고 문 헌

1. I. Etsion, 1980, "The Effect of Combined Coning and Waviness on The Separation Force in Mechanical Face Seals," *Journal Mechanical Engineering Science* Vol. 22, 2 pp. 59-64.
2. I. Etsion & A. Sharoni, 1980, "Performance of End-Face Seals with Diametral Tilt and Coning-Hydrostatic Effects," *ASLE Trans.* Vol. 23, 3, pp. 279-288.
3. A. Sharoni & I. Etsion, 1980, "Performance of End-Face Seals with Diametral Tilt and Coning-Hydrodynamic Effects," *ASLE Trans.* Vol. 24, 1, pp. 61-70.
4. I. Green & I. Etsion, 1983, "Fluid Film Dynamic Coefficients in Mechanical Face Seals," *ASME Journal of Lubrication Technology* Vol. 105, Apr pp. 297-302.
5. L. P. Ludwig & H. F. Greiner, 1978, "Designing Mechanical Face Seal for Improved Performance ; Part 1-Basic Configuration," *Mechanical Engineering*, Nov, pp. 38-46.
6. L. P. Ludwig & H. F. Greiner, 1978, "Designing Mechanical Face Seal for Improved Performance ; Part 2-Lubrication," *Mechanical Engineering*, Dec, pp. 18-23.
7. I. Etsion, 1979, "Hydrodynamic Effects in a Misaligned Radial Face Seal," *ASME Journal of Lubrication Technology* Vol. 101, Jul pp. 283-292.
8. 9.A. O. Lebeck, 1990, "Principles and Design of Mechanical face seals," *A Wiley-Interscience Publicatio*