

범프포일베어링의 탄성유체윤활 특성

김영철* · 이동현** · 김경웅**

Elasto-Hydrodynamic Lubrication Characteristics of Bump Foil Bearings

Young-Cheol Kim*, Dong-Hyun Lee**, Kyung-Woong Kim***

Key Words : Bump-foil(범프포일), Compliance(유연성), Reynolds Equation(레이놀즈 방정식),
Gas Foil Journal Bearing(가스포일저널베어링), Elasto-Hydrodynamic Lubrication(탄성유체윤활)

ABSTRACT

This paper presents modeling and simulation of the bump foil bearings with consideration of the elastic behavior of the foil and gas compressibility. Heshmat had originally introduced the simple compliance model to estimate the EHL(elasto-hydrodynamic lubrication) performance. But this approach can not consider the deflection of top foil at the edge of bearing, so model is insufficient to analyze in case that the eccentricity ratio is greater than 1. So the top foil is considered as a simple beam model supported by linear spring elements, and the bump foil deflection can be simple compliance model. The EHL calculations are performed for convention rigid type, classical foil type, variable pitch type and double bump type foil bearings. This paper presents that 2nd or 3rd generation bearings have excellent performance in every speeds.

1. 서론

최근 터보기계류는 고속화, 경량화, 단순화되어 가는 추세에 있으며, 이에 따라 공기 동압 베어링을 사용하는 경우가 늘어나고 있다. 최초의 공기포일베어링은 1970년대 Garrett Co.에서 개발하여 Boeing 727의 객실공중용 냉각터빈에 적용되었으며, 이후 Boeing 747, 757, 767, DC-10, F4, F16, F18, Falcon 2000등의 ACM(air cycle machine)에 사용되고 있다. 점차적으로 포일베어링의 부하지지능력이 향상됨에 따라 Rocket Engine의 Turbo Pump, Textile Spindle, Cryo-cooler, Motorized Blower, Heat Pump, Solar Chiller, Turbo

Compressor등에 적용되고 있으며, 고온 코팅 기술의 발전에 따라 항공기나 장갑차의 APU(auxiliary power unit), Hybrid Car나 발전용 Turbo Generator등 소형 가스터빈이나 Turbo Charger등에도 사용되고 있다.

공기포일베어링은 기본적으로 공기를 이용한 동압 베어링의 형태이기 때문에 구조가 간단하고 비용이 저렴하며, 고속에서도 토크나 동력손실이 적을 뿐 아니라 환경 친화적이고 극저온이나 고온의 극한 환경에도 사용가능하다. 또한 쉽게 변형하는 포일을 사용함으로써 부하지지능력이나 감쇠를 상당히 향상시킬 수 있으며, 강성 또한 쉽게 조절 가능하기 때문에 동적 안정성을 크게 향상시킬 수 있고, 열변형, 축정렬불량, 기계적 가공오차 등에 대한 적응성을 높임으로써 사용하기에 편리하다.

* 한국기계연구원 구조연구부

** 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : kyc@kimm.re.kr

범프포일베어링은 그 구조가 점점 복잡해짐에 따라 부하지지능력이 점차 향상되고 있으며, Dellacorte[1]는 1~3세대로 분류하였다. 범프포일베어링은 구조역학적인 거동과 공기역학 거동이 연성되어 있는 탄성유체유회 거동을 가지는데, 구조역학적으로도 공기역학적으로도 비선형적 거동을 보이기 때문에 그 특성을 해석하기란 기본적으로 아주 어렵다. 또한 3세대 베어링으로 갈수록 그 구조도 점점 복잡해지기 때문에 더욱더 그 특성을 이해하기란 어렵다.

따라서 본 연구에서는 점차 부하지지능력이 향상되고 있는 범프포일베어링에 대한 탄성유체유회 해석기법들을 소개하고, 2,3세대에 이르는 다양한 베어링에 적용하여 그 결과들을 비교 검토하고자 한다.

2. 범프포일베어링 연구동향

2.1. 부하지지능력

가스포일베어링은 foil의 구조변경 및 고온 고체마찰제의 개발로 점점 부하지지능력과 감쇠력이 향상되는 방향으로 발전하고 있다. 베어링의 성능은 하중능력계수(Load Capacity Coefficient)에 의해 표현하는데, 다음과 같이 정의되어진다.

$$W = \Gamma(L \times D)(D \times \Omega) \quad (1)$$

여기서 W : the maximum steady-state load(lbs)

L : the bearing axial length(in)

D : the shaft diameter(in)

Ω : the shaft speed(kRPM)

Γ : the load capacity coefficient(lbs/in³kRPM)

즉 하중은 베어링 투영면적 및 선속도에 비례하는 특징을 가지고 있는데, 그 비례상수 Γ 를 하중능력계수라 한다. 현재 미국 NASA에서는 Γ 값을 이용하여 포일베어링을 성능별로 1~3세대로 분류하고 있다[1].

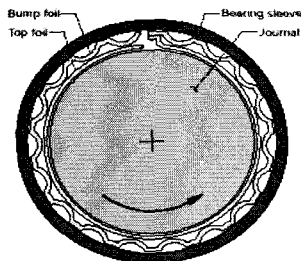


Fig.1 1st generation AFB

Fig.1은 가장 먼저 실용화되어진 1세대 범프포일베어링의 단면도를 나타낸다. 1세대 베어링의 특징은 축방향 및 원주방향으로 주기적인 범프구조를 가진다. 그 하중능력계수는 대략 0.1~0.3정도의 분포를 가지는 것으로 알려진다.

Fig.2~3은 2세대 포일베어링의 몇 가지 예를 보여준다. Fig.2는 원주방향으로 다른 범프피치(pitch)를 가진 구조로 되어 있는데, 이와 같이 원주반향으로 compliance의 변화를 줌으로써 더 넓은 운전속도에서 하중지지능력이나 안정성을 향상시킬 수 있다. Fig.3은 반경방향으로 비선형적인 compliance를 지닌 이중범프 형태이다. 이 베어링은 저속에서는 soft한 foil 특성을 지니고 고속에서는 보다 stiff한 foil 특성을 지니도록 함으로써, 넓은 운전영역에서 하중지지능력이나 안정성을 향상시킨 구조이다. 반면 축방향으로 slit를 준 경우도 2세대 베어링에 해당한다. 2세대 베어링의 하중능력계수는 대략 0.4~0.6정도의 분포를 가지는 것으로 알려진다.

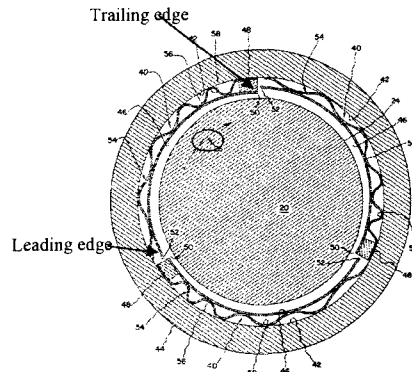


Fig.2 2nd generation AFB(I)

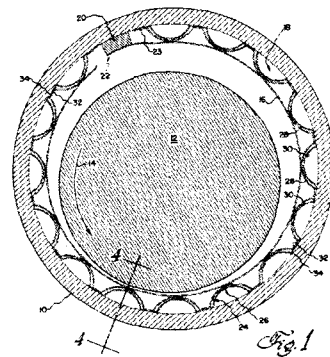


Fig.3 2nd generation AFB(II)

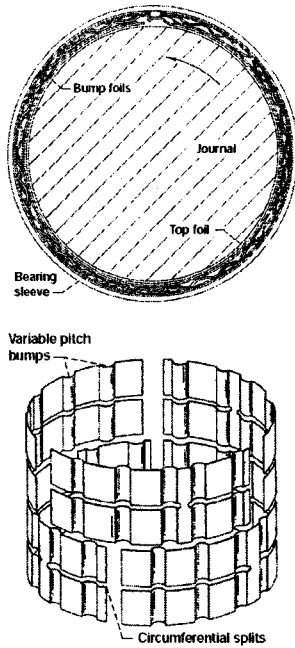


Fig.4 3rd generation AFB

Fig.4는 3세대 포일베어링의 한 예를 보여주는데, 축 방향으로 서로 다른 pitch를 가지고, 축방향으로는 포일이 분리(slit)되어 있으며, 반경방향으로도 적층구조로 되어 있다. 보통 3세대 포일베어링은 원주방향, 반경방향, 축방향 중 2방향이상 compliance의 변화를 준 형태라 할 수 있다. 3세대 포일베어링의 하중능력계수는 대략 0.8~1.4정도의 분포를 가지는 것으로 알려져 있다.

2.2. 탄성유체윤활해석 기법

범프포일베어링은 구조역학적인 거동과 공기역학 거동이 연성되어 있는 탄성유체윤활 거동을 가지는데, 구조역학적으로도 공기역학적으로도 비선형적으로 거동한다. 일반적인 범프포일베어링의 공기윤활막에 대한 지배방정식은 레이놀즈방정식(Reynolds Equation)으로 표현한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = U \frac{dh}{dx} \quad (2)$$

식(2)에서 무차원화된 유막 두께 H와 베어링수 Λ 는 각각 다음과 같이 정의되어진다(Fig.5참조).

$$H = 1 + \epsilon \cos(\theta - \phi) + \delta \quad (3)$$

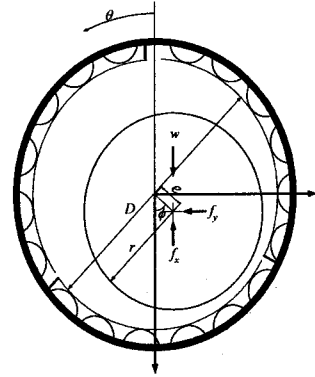


Fig.5 Coordinate system of AFB

$$\Lambda = \frac{6\mu\omega}{P_a} \left(\frac{R}{c} \right)^2 \quad (4)$$

즉, 식(3)의 유막 두께 H는 축의 기하학적 형상에 의한 부분과 포일의 변형에 의한 부분으로 구성된다. 따라서 탄성유체윤활해석은 식 (3)의 포일변형에 관한 방정식과 식 (2)의 레이놀즈방정식을 교대로 풀면서 해를 구하게 된다.

이러한 범프포일베어링에 대한 탄성유체윤활해석결과는 1980년대 초 Heshmat[2,3]에 의해 처음으로 소개되었다. 그는 포일의 강성은 윤활면에 일정 상수값으로 균일하게 분포하고, 포일의 변형은 오직 그 지점에 작용하는 압력에 의해 결정되는데, 오직 범프포일의 강성에 의해 결정된다고 가정하였다. 즉

$$\delta = \alpha(P - 1) \quad (5)$$

여기서, α 를 범프포일의 compliance라고 말하며, Fig.6에 의해 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = \frac{2P_a S}{cE} \left(\frac{l_o}{t} \right)^3 (1 - \nu^2) \quad (6)$$

이러한 Heshmat의 가정은 포일베어링 해석에 가장 보편적으로 활용되어진다.

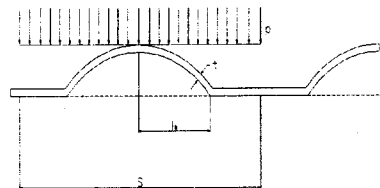


Fig. 6 configuration of bump foil

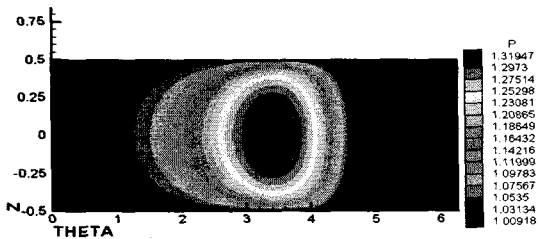
그런데 Heshmat의 해석은 베어링에서 대기압이 작용하는 가장자리(edge)에서는 포일의 변형이 없으므로 계산이 되기 때문에, 최소유막두께라는 개념의 의미가 없어지게 된다. 따라서 일반적으로 포일베어링에서는 축방향 중심선을 따르는 최소유막두께로서 정의되어지는 공칭유막두께(Nominal Film Thickness)라는 개념을 도입하여 베어링의 성능을 비교하게 된다.

이후 1990년대 초 Roger Ku[4]은 free bump의 compliance가 welded bump의 compliance보다 더 크기 때문에 포일의 원주방향분포를 선형(quasi-linear)분포라고 제안하였으며, 1990년대말 Jordanoff[5]은 슬러스트포일베어링에 대하여 선형분포를 가정하고 탄성유체윤활해석을 수행하였다. 2004년 Peng[6]은 식 (5)에서 작용하는 압력을 축방향의 평균압력을 사용함으로써 포일변형에 의한 양의 유막두께가 발생가능하고 축중심의 편심률도 1보다 크게 계산이 가능하였다.

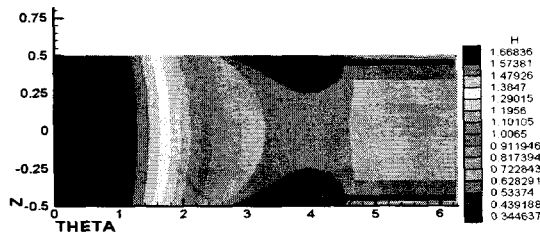
한편 2000년에 Heshmat[7]은 슬러스트포일베어링에 대한 해석을 수행하기 위하여, 식 (5)의 compliance를 계산할 때 포일의 변형을 유한요소법에 의해 계산하는 방식을 제안하였다. 그는 compliance를

$$\alpha = \frac{p_a s}{K_B h_2} \quad (7)$$

와 같이 같이 제안하였는데, 이 때 K_B 는 압력에 관한 포일변형을 나타내는 영향계수이다.



(a) Pressure Distribution



(b) Film Thickness

Fig.7 A simulated result (constant compliance)

3. 범프포일베어링의 탄성유체윤활해석

3.1 일정한 Comlinace로 가정한 해석

범프포일베어링에 있어서 공기막 두께는 결국 베어링의 기하학적 형상과 공기막에서 발생한 압력에 의한 탑포일의 변형에 의해 결정되게 된다. 탑포일의 강성을 무시하고 일정한 값의 범프포일 강성에 의해 지배된다고 가정하면, 베어링의 가장자리에서는 포일의 변형이 없고 공칭유막두께에 의해 베어링의 성능을 평가하게 된다.

Fig.7은 1 Pad를 가진 1세대 포일베어링에 대해 압력분포 및 공기막 두께를 해석한 한 예를 나타낸 그림이며, 가장자리에서 변형이 없으므로 공칭유막두께로 평가해야 함을 알 수 있다. Fig.8은 편심률에 대한 부하지지능력을 나타내는데, 가장자리의 변형이 없기 때문에 편심률이 1 이상인 경우는 실제로 계산할 수 없게 된다. Fig.9는 공칭유막두께에 대한 하중지지능력을 나타낸 그림인데, compliance에 따라 부하지지능력이 향상됨을 볼 수 있다.

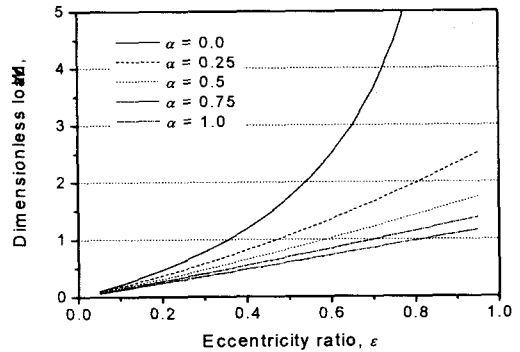


Fig.8 Load vs Eccentricity

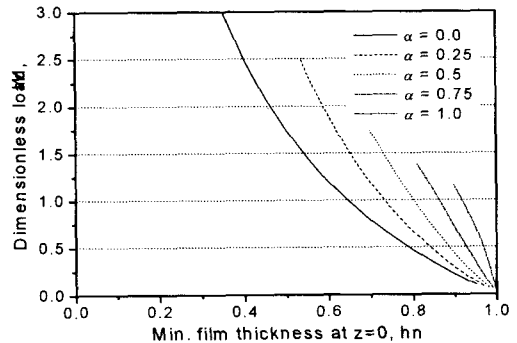


Fig.9 Load vs Nominal Film Thickness

3.2 탑포일의 변형을 고려한 해석

3.1절의 범프의 강성만을 고려한 해석은 결국 가장 자리에 변형이 없다고 계산하므로 실제 공기압에 의해 베어링면이 변화한다는 실제 물리현상을 제대로 구현하지 못한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Fig. 10과 같이 탑포일을 일정 강성을 가진 범프포일에 의해 단순지지된 beam 요소로 가정하였다. 이때의 범프포일의 단위길이당 지지강성 K는 식 (8)과 같이 주어지게 된다.

$$K = \frac{Et_b^3}{2l_b^3(1-\nu^2)} \quad (8)$$

Fig. 11은 1 Pad를 가진 1세대 포일베어링에 대해 압력분포 및 공기막 두께를 해석한 예를 나타낸 그림이며, 공기막두께가 축방향으로 일정하고, 편심률이 1 이상인 경우에도 계산이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 12는 1세대 베어링에 대해 범프의 두께를 변화시키면서 해석한 결과의 한 예인데, 저속에서는 범프의 두께가 얇은 것이 유리하고 고속인 경우에는 범프의 두께가 두꺼운 것이 유리함을 알 수 있다.

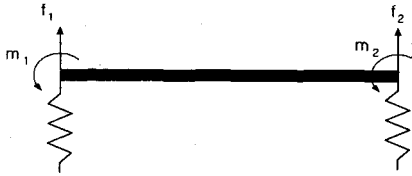
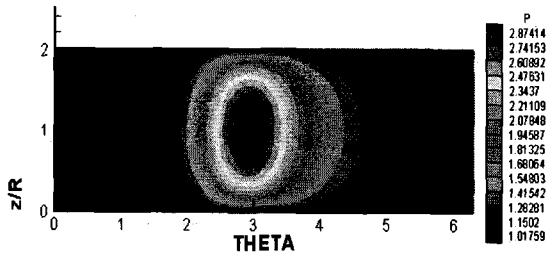
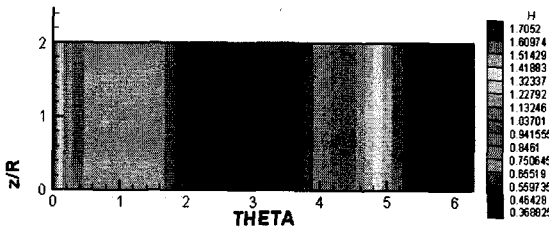


Fig. 10 Beam element model

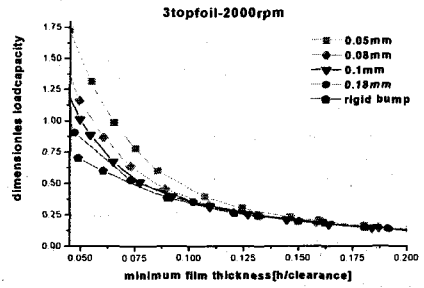


(a) Pressure Distribution

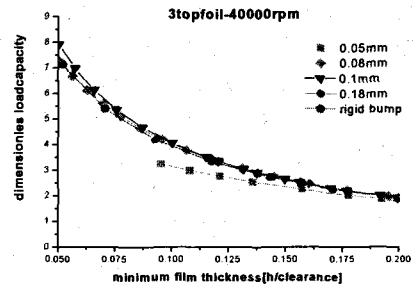


(b) Film Thickness

Fig.11 A simulated result (using beam model)

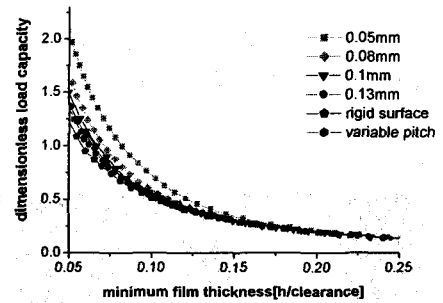


(a) at low speed (2000rpm)

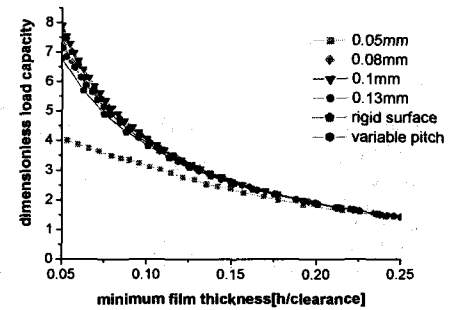


(b) at high speed (40000rpm)

Fig.12 Load capacity curve of 1st gen. bearing



(a) at low speed (2000rpm)



(b) at high speed (40000rpm)

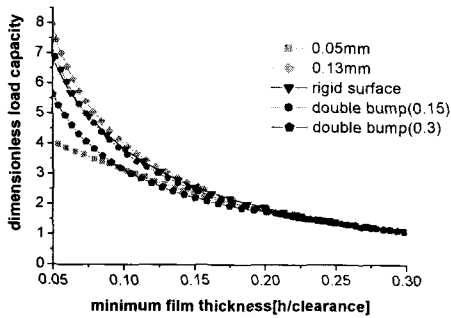
Fig.13 Load capacity curve of 2nd gen. bearing

3.3 가변피치 베어링에 대한 해석

가변피치베어링은 저속과 고속에서 모두 우수한 성능을 발휘하도록 설계한 대표적인 2세대 베어링이다. 이 베어링은 회전방향을 따라 피치가 점점 줄어드는 구조를 가진다. Fig. 13은 가변피치베어링에 대해 해석한 결과중 하나인데, 고속과 저속에서 양호한 성능을 가짐을 볼 수 있다.

3.4 이중범프 베어링에 대한 해석

이중범프베어링은 저속과 고속에서 모두 우수한 성능을 발휘하도록 설계한 대표적인 2또는 3세대 베어링이다. 이 베어링은 변형량이 커짐에 따라 강성이 커지는 포일구조를 가진다. 저속에서는 Fig.12(a) 또는 Fig.13(a)에서 포일이 두께가 얇은 경우의 거동과 동일한 거동을 가진다. 또한 Fig. 14에서 보는 바와 같이 고속이 되어도 양호한 성능을 유지한다.



(a) at high speed(40000rpm)

Fig.14 Load capacity curve of 3rd gen. bearing

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 범프포일베어링의 해석기술 및 설계기술 동향을 파악하여 기술하였다.
- 2) Heshmat이 제시한 고전적인 해석기법의 문제점을 파악하고, 탑포일의 변형을 고려한 탄성유체운활성능해석기법을 제안하였다.
- 3) 2세대 및 3세대 베어링에 대해 탄성유체운활성능 해석을 수행하고, 성능향상의 원리를 규명하였다.
- 4) 개발된 해석기법을 이용해 고성능 베어링의 최적 설계에 활용가능하다.

- 5) 향후, 현재의 해석기법을 보완함으로써 보다 우수한 포일베어링 해석도구를 확보하고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점/차세대신기술 개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] C. Dellacorte and M.J.Valco, 2000, "Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications", Tribology Transactions, pp795-801.
- [2] H. Heshmat, J.A.Walowit and O.Pinkus, 1983, "Analysis of Gas-Lubricated Compliant Thrust Bearings", ASME J. Lubrication Technology, pp 638-646.
- [3] H. Heshmat, J.A.Walowit and O.Pinkus, 1983, "Analysis of Gas-Lubricated Foil Journal Bearings", ASME J. Lubrication Technology, pp 647-655.
- [4] C.-P. Roger Ku and H. Heshmat, 1992, "Compliant Foil Bearing Structural Stiffness Analysis : Part I - Theoretical Model Including Strip and Variable Bump Foil Geometry", ASME J. Tribology, pp 394-400
- [5] I. Iordanoff, 1999, "Analysys of an Aerodynamic Compliant Foil Thrust Bearing : Method for a Rapid Design", ASME J. Tribology, pp. 816-630.
- [6] Z.-C. Peng and M.M. Khonsari, 2004, "Hydrodynamic Analysis of Compliant Foil Thrust Bearings with Compressible Air Flow", ASME J. Tribology, pp542-546
- [7] C. A. Heshmat, D. S. Xu and H. Heshmat, 2000, "Analysis of Gas Lubricated Foil Thrust Bearings Using Coupled Finite Element and Finite Difference Methods", ASME J. Tribology, pp199-204