

공기 포일 스러스트 베어링의 한계 지지하중 해석

정시영[†]

인하공업전문대학 항공기계과

The Limiting Load Capacity of Air Foil Thrust Bearings

Si Young Jung[†]

Dept. of Aircraft & Mechanical Engineering, Inha Technical College

(Received July 2, 2009; Revised August 15, 2009; Accepted August 20, 2009)

Abstract – The limiting load capacity of air foil thrust bearings at extremely high operating speeds is theoretically investigated. The limiting load capacity of a sector is shown to increase as the angular extent β and the inlet film thickness h_1 of the bearing increase, while it decreases with an increase in the ramp ratio b and the compliance α of the bearing. But it is found that the angular extent of the bearing is not related to the total limiting load capacity of the 360° thrust bearing.

Keywords – air foil(공기포일), thrust bearing(스러스트 베어링), limiting load(한계 지지하중), compliance(컴플라이언스), compressibility number(압축성 계수)

기호설명

b	: ramp ratio
E	: module of elasticity
H_1	: inlet film thickness
H_2	: minimum film thickness
h	: film thickness ($=H/H_2$)
h_1	: inlet film thickness ($=H_1/H_2$)
L	: width of sector ($=R_2 - R_1$)
l_0	: half length of bump foil
p	: pressure ($=P/p_a$)
p_a	: ambient pressure
R_1	: inner radius of sector
R_2	: outer radius of sector
r	: radial coordinate ($=R/R_2$)
S	: pitch of bump foil
t	: thickness of bump foil
w	: limiting load of sector ($=W/p_a R_2^2$)

w_{total}	: total load of bearing
α	: compliance
β	: angular extent of sector
θ	: circumferential coordinate
A	: compressibility number
μ	: absolute viscosity of air
ν	: Poisson ratio
ω	: angular velocity

1. 서 론

최첨단의 고성능 회전기계는 성능 향상을 위해 분당 수십만 회전의 초고속 운전과 제품의 소형화, 베어링의 무한 수명 및 극한환경에서의 신뢰성 등을 필요로 하고 있다. 이러한 설계조건에 부합하는 초고속 무급유 회전기계(Oil Free Rotating Machines)를 항공우주산업에서 개발하기 시작하였으며, 이에 적합한 베어링으로서 공기를 윤활유로 사용하고 베어링 내면을 탄성체로 구성한 공기 포일 베어링(Air Foil Bearing)을 개발하여 활용하고 있다[1,2].

[†]주저자 · 책임저자 : siyjung@inhac.ac.kr

Heshmat 등[3]은 베어링 표면을 탄성체로 구성된 공기 포일 스러스트 베어링(Air Foil Thrust Bearing)을 처음으로 제안하였으며, 각종 설계변수가 베어링 성능에 미치는 영향과 공기 포일 베어링의 많은 장점을 연구 발표하였다. 또한 베어링 지지하중에 관한 실험을 통하여 이론적 해석결과의 타당성도 입증하였다[4]. 이후 유한 요소법을 사용하여 탄성체인 베어링 표면의 변형을 정밀 해석하여 공기유통 베어링 성능을 보다 정확히 해석하였으며[5], 또한 Park 등[6]은 포일 간의 마찰력과 베어링 섹터의 기울기 영향을 고려하여 공기 포일 스러스트 베어링의 정적, 동적 특성을 광범위하게 해석하였다. Jordanoff [7,8]는 최대 지지하중을 갖는 강체 공기 스러스트 베어링을 설계하기 위하여 무한 장폭 베어링의 이론을 기초로 강체 공기 베어링의 최적 형상을 산출하였으며, 이를 공기 포일 스러스트 베어링에 응용하였다. Peng 등[9]은 무한대의 회전속도에서 얻을 수 있는 공기 포일 저널 베어링의 한계 지지하중을 해석하였으며, Kim 등[10]도 베어링의 가공 조립과정에서 발생할 수 있는 예부하(preload)를 고려한 공기 포일 저널 베어링의 한계 지지하중과 최소 유막두께 등을 분석하였다.

본 연구에서는 공기 포일 스러스트 베어링의 한계 지지하중에 관한 성능을 이론적으로 해석하였다. 무한대의 회전속도에서, 즉 베어링 압축성계수가 무한의 크기에 접근할 때 ($A \rightarrow \infty$) 공기 포일 스러스트 베어링이 지지할 수 있는 한계 지지하중을 이론적으로 산출하였다. 또한 공기 포일 스러스트 베어링의 각종 설계변수가 한계 지지하중 성능에 미치는 영향도 분석 검토하였다.

2. 스러스트 공기 포일 베어링 해석

2-1. 공기유통 지배방정식

압축성 유체인 공기를 유통체로 사용하는 스러스트 포일 베어링의 좌표계는 Fig. 1에서 보여주고 있다. 공기가 이상기체이며 등온상태라고 가정할 때 압축성 유체에 관한 Reynolds의 무차원 유통 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(p h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta} (p h) \quad (1)$$

위 지배방정식에 사용한 무차원 계수는 다음과 같다.

$$h = \frac{H}{H_2}, r = \frac{R}{R_2}, p = \frac{P}{p_a}, \Lambda = \frac{6\mu\omega(R_2)^2}{p_a(H_2)^3} \quad (2)$$

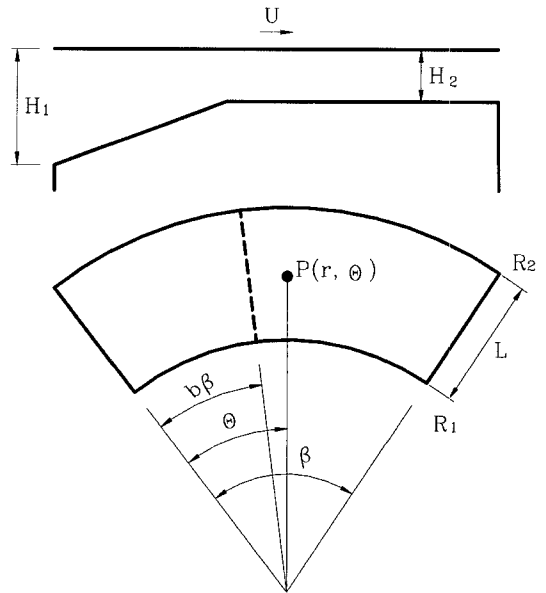


Fig. 1. Coordinate system of air foil thrust bearings.

여기서 p_a 는 대기압이며 A 는 베어링의 압축성계수(compressibility number)이다. H_2 와 R_2 는 각각 베어링의 최소 유막두께와 바깥지름의 반경이다.

베어링 표면이 강체인 일반 저널 베어링과 다르게 범프 포일(Bump Foil) 베어링은 베어링 내에서 발생하는 유막압력으로 인하여 범프가 탄성 변형하기 때문에 유막두께가 변화한다. 범프 포일의 강성은 일정하며 압력에 선형적으로 비례하여 변형한다고 가정하면 스러스트 공기 포일 베어링의 무차원 유막두께는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h = 1 + g(\theta) + \alpha(p - 1) \quad (3)$$

여기서

$$g(\theta) = (h_1 - 1) \left(1 - \frac{\theta}{b\beta} \right) \quad \text{at } 0 \leq \theta \leq b\beta \quad (4)$$

$$= 0 \quad \text{at } b\beta \leq \theta \leq \beta$$

위 식에서 h_1 은 H_1/H_2 이며, β 와 b 는 각각 베어링 섹터(sector)의 원호 각도와 경사 비율을 의미한다. Fig. 2에서 보여주는 범프 포일의 컴플라이언스 계수(compliance coefficient) α 는 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$\alpha = \frac{2p_a S (l_0)^3}{H_2 E (t)} (1 - \nu^2) \quad (5)$$

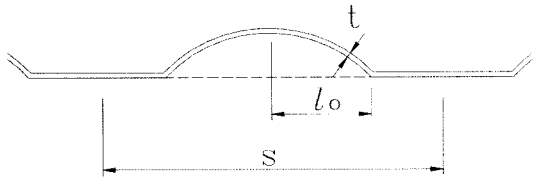


Fig. 2. Configuration of bump foil.

위 식에서 $S, 2l_0, t, E, \nu$ 는 각각 범프 포일의 피치, 길이, 두께, 탄성계수 및 포아슨 계수이다.

2.2. 한계 지지하중

베어링의 회전속도가 증가하여 무한대에 도달한다면 베어링 압축성계수도 무한대의 값을 갖는다. 따라서 압축성계수가 무한대의 값에 도달하기 때문에 Reynolds의 공기윤활 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta}(ph) = 0 \tag{6}$$

베어링 섹터의 경계주변 압력은 대기압과 같기 때문에 위 방정식에 의 경계조건을 적용하면 다음과 같은 유막압력에 관한 식을 얻는다.

$$p = \frac{h_1}{h} \tag{7}$$

위의 유막압력에 관한 식으로부터 베어링 섹터의 구간별 유막압력 분포를 구하면 다음과 같다.

$$p = \frac{-Y + \sqrt{Y^2 + 4\alpha h_1}}{2\alpha} \quad 0 \leq \theta \leq b\beta \tag{8a}$$

$$p = \frac{(\alpha - 1) + \sqrt{(\alpha - 1)^2 + 4\alpha h_1}}{2\alpha} \quad b\beta \leq \theta \leq \beta \tag{8b}$$

여기서 $Y = (h_1 - \alpha) - (h_1 - 1) \frac{\theta}{b\beta}$

유막 압력식 (8a)에 $\theta = 0$ 를 대입하면 $p = 1$ 의 결과를 얻는다. 또한 식(8a)에 $\theta = b\beta$ 를 대입하면 유막압력식 (8b)과 동일한 결과식을 얻으며 $b\beta \leq \theta \leq \beta$ 의 구간에서는 압력의 크기가 일정하다.

또한 이러한 유막압력 분포를 기초로 포일 베어링의 변형된 최종 유막두께도 산출할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$h = \frac{1}{2} [Y + \sqrt{Y^2 + 4\alpha h_1}] \quad , 0 \leq \theta \leq b\beta \tag{9a}$$

$$h = \frac{1}{2} [1 - \alpha + \sqrt{(\alpha - 1)^2 + 4\alpha h_1}] \quad , b\beta \leq \theta \leq \beta \tag{9b}$$

다음으로 베어링 섹터의 표면을 따라 유막압력을 적분하여 공기 포일 슬러스트 베어링의 무차원 한계 지지하중을 산출하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$w = W/p_a R_2^2 = \int_0^\beta \int_{1-(L/R_2)}^1 (p-1)r \, dr \, d\theta$$

$$= \frac{L}{R_2} \left(1 - \frac{L}{2R_2} \right) \left\{ \frac{b\beta}{4\alpha(h_1-1)} \cdot F_{taper} + \frac{(1-b)\beta}{2\alpha} \cdot F_{flat} \right\} \tag{10}$$

여기서

$$F_{taper} = 2(1-\alpha h_1) - (\alpha - 1)^2 + (\alpha - 1)\sqrt{Q}$$

$$+ 4\alpha h_1 \cdot \ln \frac{\sqrt{Q} + (\alpha - 1)}{2\alpha}$$

$$F_{flat} = \sqrt{Q} - (a + 1) \tag{11}$$

$$Q = (\alpha - 1)^2 + 4\alpha h_1$$

그리고 한 개의 베어링 섹터가 지지하는 한계 지지하중에 섹터의 수를 곱함으로써 공기 포일 슬러스트 베어링이 지지할 수 있는 총 한계 지지하중의 크기를 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$w_{total} = w \cdot \frac{360^\circ}{\beta^\circ} \tag{12}$$

여기서 식(12)를 살펴보면 베어링의 회전속도가 무한대 크기로 상승할 경우($A \rightarrow \infty$)에 얻을 수 있는 베어링의 총 한계 지지하중은 섹터의 크기 β 와 무관하다는 것을 보여 주고 있다. 또한 L/R_2 비율 값에 따라 지지하중은 2차 함수적으로 상승하여 $L=R_2$ 일 때 최고치에 도달함을 쉽게 알 수 있다. 나머지 설계변수가 β, h_1, b, α 베어링의 한계 지지하중에 미치는 영향은 다음 장에서 자세히 서술하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

Fig. 3은 무한대의 회전속도로 상승하여 베어링 압축성계수가 무한 크기에 도달($\Lambda \rightarrow \infty$)할 때 얻을 수 있는 베어링 섹터 중심선 상의 유막압력 분포도를 보여주고 있다. 베어링 압축성계수 $\Lambda = 10, 100$ 의 경우는

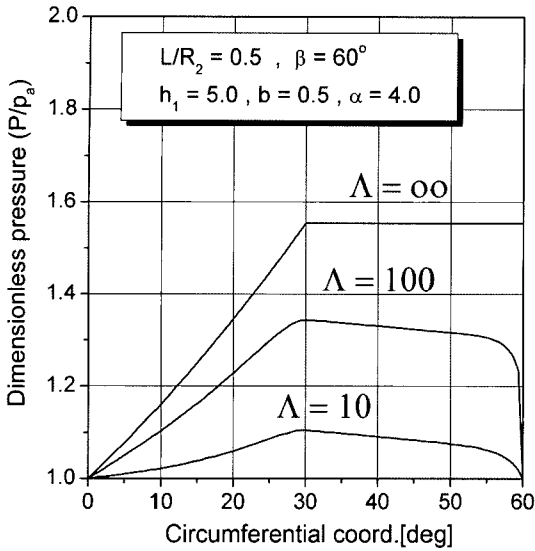


Fig. 3. Dimensionless pressure profiles for $\Lambda=10, 100, \infty$.

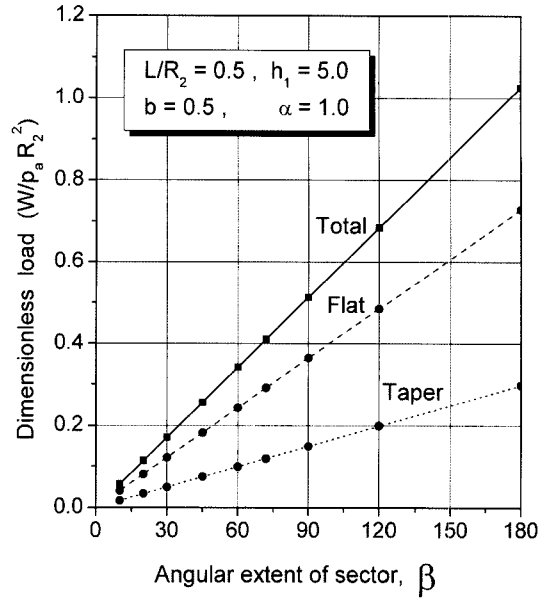


Fig. 5. Dimensionless limiting load vs. angular extent of sector.

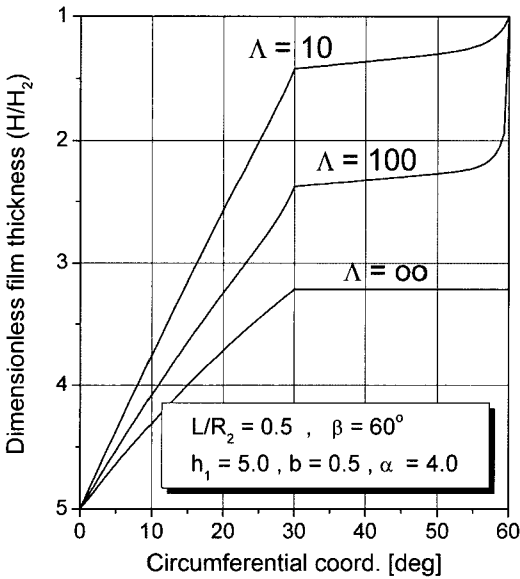


Fig. 4. Dimensionless film thickness for $\Lambda=10, 100, \infty$.

Heshmat[3]의 공기 유힐해석법에 따라 얻은 유막압력이다. 압축성계수 $\Lambda = \infty$ 일 경우는 최대 유막압력이 $p_{max} = 1.55$ 인 일정한 크기의 값을 갖으며, $\Lambda = 10, 100$ 의 경우는 유막압력이 최대 $p = 1.34, p = 1.11$ 에 도달한 후 점차 감소하고 있다.

Fig. 4는 유막압력으로 인하여 압축 변형한 베어링의 유막두께를 보여주고 있다. 베어링 압축성계수가 $\Lambda = \infty$ 일 경우에 베어링 표면이 가장 많이 압축 변형

되어 최소 유막두께가 가장 크게 증대하는 것을 알 수 있다. 즉 유막압력이 증가하면 (또는 베어링 하중이 증가하면) 최소 유막두께의 크기가 증가하기 때문에 오히려 더욱 안정된 베어링 운전조건을 확보할 수 있다는 포일 베어링의 잇점을 보여주고 있다.

Fig. 5~8은 공기 포일 슬러스트 베어링의 한계 지지하중 성능에 미치는 베어링 설계변수의 영향을 보여주고 있다. 슬러스트 베어링의 사양은 폭경비 $L/R_2 = 0.5$, 섹터의 크기 $\beta = 60^\circ$, 입구 유막두께 $h_1 = 5.0$, 경사 비율 $b = 0.5$, 컴플라이언스 이다. Fig. 5는 섹터의 크기 β 가 증가함에 따라 이에 비례하여 1개 섹터의 지지하중이 증가함을 보여주고 있다. 그러나 베어링 전체의 총 한계 지지하중 크기는 섹터의 크기 β 와는 무관하며 일정함을 이미 앞에서 이론적으로 밝힌바 있다. 또한 섹터의 평면 지역(Flat)에서 생성되는 지지하중이 경사지역(Taper)에서 생성되는 지지하중보다 크다는 것도 알 수 있다.

Fig. 6은 베어링 입구에서의 유막두께 h_1 이 베어링 한계 지지하중에 미치는 영향을 보여주고 있다. 입구에서의 유막두께가 증가함에 따라 베어링의 한계 지지하중 성능이 크게 증가하고 있다.

Fig. 7은 베어링 섹터의 경사지역(Taper)과 평면지역(Flat)의 비율 b 의 영향을 보여주고 있다. 경사 비율 b 가 증가함에 따라 섹터의 한계 지지하중 성능이 이에 반비례하여 감소하고 있으나, 경사지역의 지지하중은

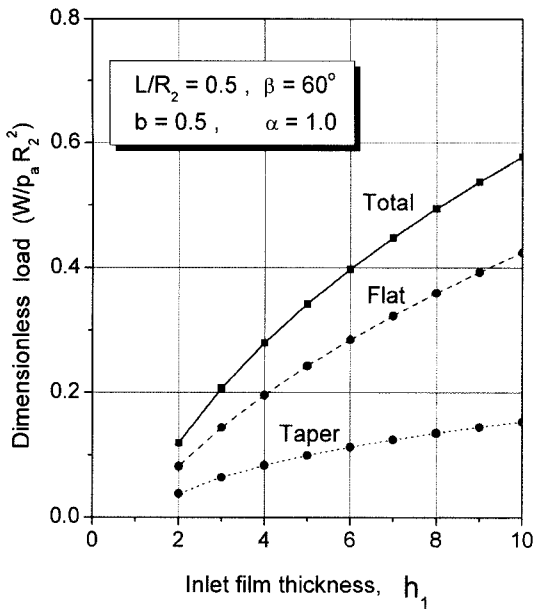


Fig. 6. Dimensionless limiting load vs. inlet film thickness.

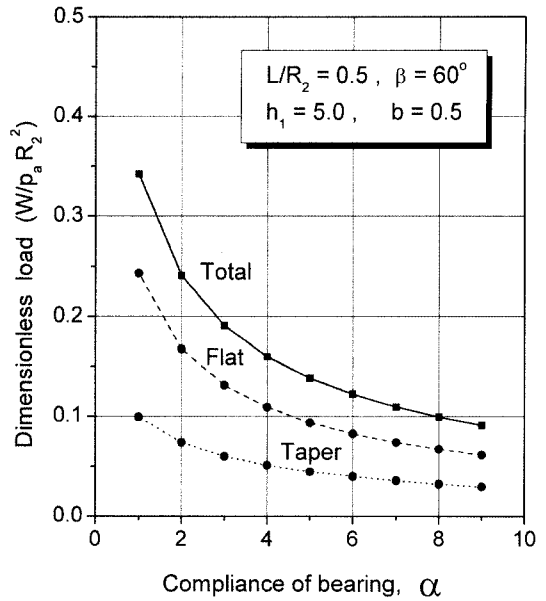


Fig. 8. Dimensionless limiting load vs. compliance of bearing.

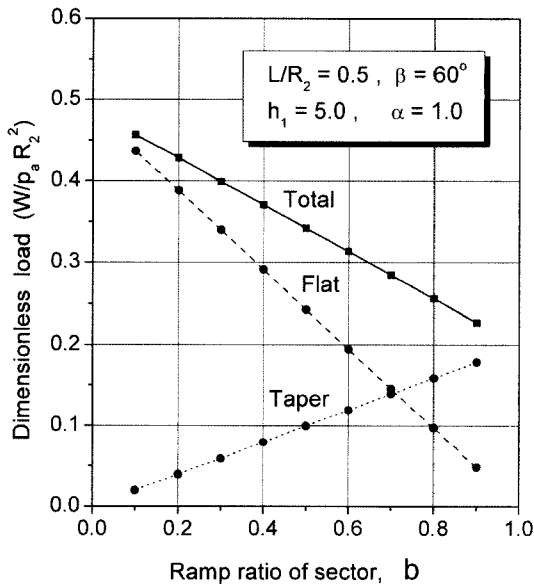


Fig. 7. Dimensionless limiting load vs. ramp ratio of sector.

증가하고, 평면지역의 지지하중은 감소하고 있다.

그리고 베어링 내면의 탄성이 증가하면, 즉 컴플라이언스 α 가 커지면 베어링 섹터의 한계 지지하중은 크게 감소하고 있음을 Fig. 8에서 보여주고 있다.

4. 결 론

공기 포일 슬러스트 베어링이 지지할 수 있는 베어링의 한계 지지하중을 이론적으로 해석하였다. 베어링의 회전속도가 증가하여 무한대의 회전속도에 도달할 경우, 즉 베어링 압축성계수가 무한 크기로 접근할 때 ($\lambda \rightarrow \infty$) 공기 포일 슬러스트 베어링이 지지할 수 있는 최대의 한계 지지하중을 이론적으로 산출하였다. 공기 포일 섹터의 한계 지지하중은 섹터의 크기 β , 베어링 입구의 유막두께 h_1 이 증가함에 따라 증가하지만, 경사 비율 b 와 컴플라이언스 α 가 증가함에 따라 베어링 섹터의 한계 지지하중은 감소한다. 그러나 베어링 전체가 360로 구성되어 있는 공기 포일 슬러스트 베어링의 총 한계 지지하중은 섹터 크기 β 의 영향을 받지 않는다.

후 기

본 연구는 2008학년도 인하공업전문대학 교내연구비에 의하여 지원되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. Agrawal, G. L., "Foil Air/Gas Bearing Technology - An Overview", ASME 97-GT-347, International Gas

- Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Orlando, Florida, 1997.
2. Walton, J. F. and Heshmat, H., "Application of Foil Bearings to Turbomachinery Including Vertical Operation", *J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, pp. 1032-1041, 2002.
 3. Heshmat, H., Walowitz, J. A. and Pinkus, O., "Analysis of Gas Lubricated Compliant Thrust Bearing", *J. of Lubrication Technology*, Vol. 105, No. 105, pp. 638-646, 1983.
 4. Heshmat, H. and Shapiro, W., "Advanced Development of Air Lubricated Foil Thrust Bearings", *J. of the American Society of Lubrication Engineers*, Vol. 40, No. 1, pp. 21-26, 1984.
 5. Heshmat, C. A., Xu, D. S. and Heshmat, H., "Analysis of Gas Lubricated Foil Thrust Bearings Using Coupled Finite Element and Finite Difference Methods", *J. of Tribology*, Vol. 122, pp. 199-204, 2000.
 6. Park, D. J., Kim C. H., Jang, G. H. and Lee, Y. B., "Theoretical Considerations of Static and Dynamic Characteristics of Air Foil Thrust Bearing with Tilt and Slip Flow", *Tribology International*, Vol. 41, Issue 4, pp. 282-295, 2008.
 7. Iordanoff, I. "Maximum Load Capacity Profiles for Gas Thrust Bearings Working Under High Compressibility Number Conditions", *J. of Tribology*, Vol. 120, pp. 571-576, 1998.
 8. Idordanoff, I. "Analysis of an Aerodynamic Compliant Foil Thrust Bearing : Method for a Rapid Design", *J. of Tribology*, Vol. 121, pp. 816-822, 1999.
 9. Peng, Z. C. and Khonasari, M. M., "On the Limiting Load-Carrying Capacity of Foil Bearings", *J. of Tribology*, Vol. 126, pp. 817-818, 2004.
 10. Kim, T. H. and San Andres, L., "Limits for High-Speed Operation of Gas Foil Bearings", *J. of Tribology*, Vol. 128, pp. 670-673, 2006.