

# 나선 홈을 가진 반구형 공기 동압베어링에서 진구도 오차의 영향 해석

최우천\*, 신용호\*\*, 최정환\*\*\*

## Analysis of the Effects of Out-of-Sphericity in Spiral Grooved Hemispherical Air dynamic Bearings

Woo Chun Choi\*, Yong Ho Shin\*\*, and Chung Whan Choi\*\*\*

### ABSTRACT

Out-of-sphericity is degree of deformation of an air bearing sphere deviated from a perfect sphere. This paper investigates numerically the effect of out-of-sphericity error on the radial stiffness of an air bearing. Three types of out-of-sphericity modes are considered. In this study, the stiffness is calculated from pressure distribution at the bearing surface, which is obtained by solving the Reynolds equation. In some cases, large out-of-sphericity errors are found to improve the stiffnesses of air bearings. This implies that an air bearing of perfect hemispheres is not necessarily of the best performance. Thus, much labor and cost in manufacturing air bearings can be saved. In addition, the radial stiffness of an air bearing depends greatly on the application direction.

**Key Words** : Out-of-Sphericity (진구도 오차), Air Dynamic Bearing (공기 동압베어링), Stiffness (강성), Clearance (간극), Wedge Effect (웨지효과), Eccentricity (편심), Groove (홈), Rotor (회전자), Stator (고정자)

### 1. 서론

공기 동압베어링은 공기를 윤활제로 사용하기 때문에 기계식 볼베어링의 단점인 접촉으로 인한 소음, 발열, 마모 등이 적게 발생한다. 그리고 공기 동압베어링은 고속 경량회전체의 지지에 적합하므로 컴퓨터 산업과 멀티미디어 산업의 발전에 따라 레이저 프린터, 스캐너, 하드디스크 등에서 점차 기계식 베어링을 대체하여 사용될 전망이다.

이러한 공기 베어링에 대해서 여러 연구결과가 발표되었다. 공기 윤활 나선형 홈의 반구형 베어링

의 부하하중과 축방향 강성의 관계 및 진동특성<sup>(1)</sup>, 편심된 유한한 길이의 공기 동압 저널베어링의 압력분포와 성능에 대한 연구<sup>(2)</sup>, 나선형 홈을 가진 반구형 및 원추형 베어링의 압력분포에 관한 연구<sup>(3)</sup>, 나선 홈을 가진 헤링본 무늬 저널베어링의 펌핑효과<sup>(4)</sup>, 편심된 나선형 홈의 반구형 베어링에 대해 평면 해석 이론을 적용하여 베어링의 여러 제작 조건이 부하하중에 미치는 영향을 해석한 연구<sup>(5)</sup>, 나선 홈을 가진 공기 동압베어링의 성능 실험과 해석<sup>(6-8)</sup> 등 공기 베어링에 관련된 여러 가지 연구보고가 있다.

\* 고려대학교 기계공학과

\*\* 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 현대자동차

본 연구에서는 진구도 오차가 베어링의 반경방향 강성에 미치는 영향을 수치해석적으로 연구한다. 진구도 오차는 베어링의 구가 완전한 구에서 찌그러진 정도로 정의된다. 지금까지의 타 연구에서는 이와 같은 진구도 오차의 영향을 다루지 않았다. 진구도 오차는 공기 베어링의 성능과 제작비용에 큰 영향을 주므로 매우 중요한 변수라 할 수 있다. 본 연구에서는 회전자의 위치와 진구도 오차에 의한 간극분포를 입력으로 하여 베어링에서의 압력 분포를 구한다. 그리고 압력을 적분하여 베어링이 회전자에 가하는 힘을 구하고, 힘-변위 관계로부터 강성을 구한다.

## 2. 기초 이론

### 2.1 지배방정식

Fig. 1(a)는 본 연구의 대상인 공기 동압베어링의 개략도를 보여준다. 회전자가 회전하면 주위의 공기가 고정자와 회전자 사이의 간극으로 유입되고 흡에서의 웨지효과로 인해 압력이 상승하여 회전자를 부상시킨다. Fig. 1(b)에는 공기베어링에서의 설계변수가 나타나 있다.

공기 동압베어링은 공기의 유향 작용을 이용하여 회전체를 지지한다. 따라서 해석을 위해 유향 방정식인 레이놀즈 방정식을 지배방정식으로 사용한다.

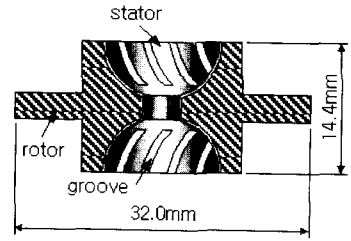
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p^2}{\partial y} \right) = 12\mu \left\{ U \frac{\partial(ph)}{\partial x} + V \frac{\partial(ph)}{\partial y} + 2 \frac{\partial(ph)}{\partial t} \right\} \quad (1)$$

레이놀즈 방정식에 다음과 같은 조건을 적용하여 단순화시킨 후에 무차원화한다.

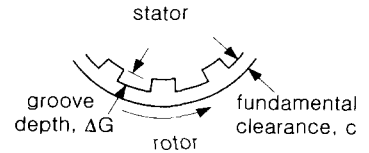
$$V = V(\bar{X}), U = 0, \frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (\text{정상상태}) \quad (2)$$

무차원화시킨 식을 유한차분법으로 전개한다. 이 전개된 식에 경계조건을 적용하고, TDMA(Tri Diagonal Matrix Algorithm)<sup>(9)</sup>와 circular TDMA<sup>(10)</sup>를 사용하여 압력분포를 구한다.

흡의 각도에 상관 없이 절점을 흡의 경계를 따라서 설정하기 위하여 좌표변환을 한다. Fig. 2에서와 같이 두 번 좌표변환하여 흡이 원주에 직각이 되도록 x"-y" 좌표계를 만든다. 지배방정식을 자코비안을 사용하여 x"-y" 좌표계에 맞도록 변환한다.

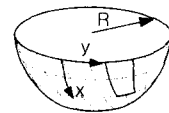


(a) stator and rotor

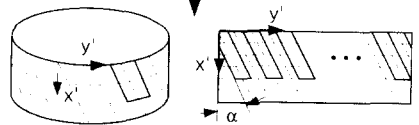


(b) Groove depth and fundamental clearance

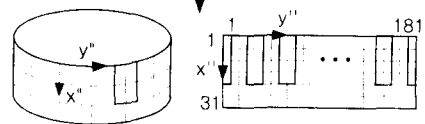
Fig. 1 Schematic of a hemispherical spiral-grooved air bearing.



(a) bearing surface



(b) Transformed plane(slanted grooves)



(c) Transformed plane(straight grooves)

Fig. 2 Coordinate systems.

본 연구에서는 설계변수를 아래와 같이 정하였다.

- 기본간극 :  $c = 4 \mu\text{m}$
- 홈깊이 :  $\Delta G = 4 \mu\text{m}$
- 회전각속도 :  $\omega = 18,000 \text{rpm} = 1885 \text{rad/s}$
- 베어링 반경 :  $R = 6.2 \times 10^{-3} \text{m}$
- 베어링수 :  $A = 6 \frac{\mu\omega}{P_a} \left(\frac{R}{c}\right)^2 = 4.789$

해석에서 절점 수는 x" 방향으로 31, y" 방향으로 181로 정하였다. 자세한 내용은 참고문헌<sup>(11)</sup>에 나타나 있다.

## 2.2 공기 베어링의 강성

Fig. 1과 같은 공기 동압베어링의 회전자를 단위 변위만큼 움직이는데 필요한 하중을 강성이라고 정의한다. 실제 실험에서 변위가 적은 경우에는 하중-변위 관계가 선형적이다가 변위가 어느 이상이 되면 비선형적으로 된다. 이때 선형적인 증가부분의 기울기를 강성으로 정의한다.

해석에서 강성을 구하는 방법은 먼저 편심을 입력값으로 하여 압력분포를 구한 뒤 복원력을 구한다. 여러 편심값에 대해 복원력을 구하고, 이로부터 얻은 복원력과 편심의 관계로부터 강성을 구한다.

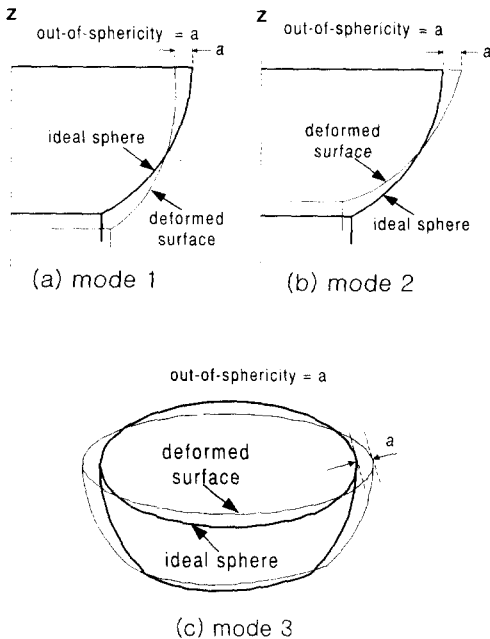


Fig. 3 Modes of out-of-sphericity.

## 3. 진구도 오차

고정자의 구가 완전한 구에서 찌그러진 정도를 진구도 오차라 정의한다. 진구도 오차가 '0' (완전한 구)이라면 편심이 없는 경우 전체 간극은 일정하게 된다. 그러나 진구도 오차가 존재하면 편심이 없는 경우에도 간극이 일정한 값을 갖지 않게 되므로 압력분포 또한 변한다. 따라서 진구도 오차는 베어링의 강성과 하중능력 등에 영향을 준다.

고정자의 반구는 제작 조건에 따라 찌그러짐이 여러 방향으로 발생할 수 있다. 본 연구에서는 세 가지 진구도 오차 모드를 고려하였다. Fig. 3에서의 세 모드에 대하여 진구도 오차는 모두 a이며 단위는  $\mu\text{m}$ 이다. 첫 번째는 Fig. 3(a)에서와 같이 축대칭으로 상단부는 반경 방향으로 줄어들고, 이 단면 그림에서 베어링 부분의 길이가 일정하도록 하단부가 반경 방향으로 늘어나는 변형모드로서 mode 1로 칭한다. 두 번째는 Fig. 3(b)와 같이 축대칭이며 mode 1과 반대로 변형이 일어난 모드로서 mode 2로 명명한다. 마지막으로 mode 3은 Fig. 3(c)에서와 같이 반경 방향으로 찌그러져 고정자가 원주방향으로 타원이 되는 모드이다.

해석프로그램에서는 mode 1과 mode 2를 구현하기 위해 간극 값에 x" 방향으로 진폭이 진구도 오차인 코사인 함수의 1/2 주기를 적용하였고, mode 3은 y" 방향의 간극 값에 코사인 함수의 2 주기를 적용하여 구현하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 모드에 따른 간극분포와 압력분포

각 mode에 대하여 공기 동압베어링의 상반구에서 편심이 없는 경우의 간극분포와 압력분포의 특성을 비교하였다. 하반구는 상반구와 대칭 관계이므로 상반구에서의 분포만을 비교하였다.

나선형 공기 동압베어링에서는 두가지의 요소가 압력분포에 영향을 미친다. 첫째는 간극으로서 홈에서 웨지효과가 발생할 때 간극이 적을수록 압력은 급격히 증가한다. 둘째는 홈의 각도로서 회전자의 회전에 의해 공기가 나선홈을 따라서 흡입부(상단부)로 들어가면서 압력분포에 영향을 준다.

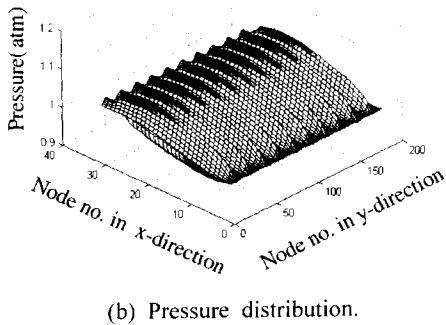
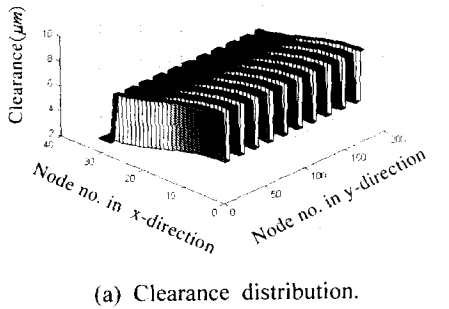


Fig. 4 Clearance and Pressure distribution of mode 1.

mode 1의 경우, 진구도 오차가 1일 때의 간극과 압력의 분포가 Fig. 4와 같이 나타나 있다. 상단부에서 간극이 크고 하단부에서 간극이 작아서 이 영향으로 압력이 상단부에서 낮고 하단부에서 높다. 전체적으로는 공기 흡입부(상단부)에서 압력이 충분히 상승하지 못하여 전체적으로 압력이 낮다.

mode 2의 경우에는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 간극은 mode 1의 경우와 반대로 상단부에서 작으며 하단부로 갈수록 증가하게 된다. 공기흡입부에서 간극이 작으므로 압력이 급격하게 상승하고, 하단부에서는 간극이 커지므로 압력이 점차 감소한다. 흡입부에서의 높은 압력 상승의 영향으로 전체적으로는 mode 1보다 압력이 높다.

Fig. 6은 mode 3에 대한 것으로, 고정자 반구의 지름이 x축 방향으로 늘어나고 y축 방향으로 줄어든 경우의 간극과 압력의 분포이다. x축의 방향으로로는 간극이 작아져 압력이 커지며, y축의 방향으로로는 간극이 커져 압력이 감소한 것을 볼 수 있다.

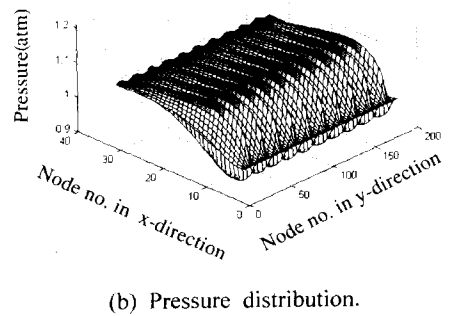
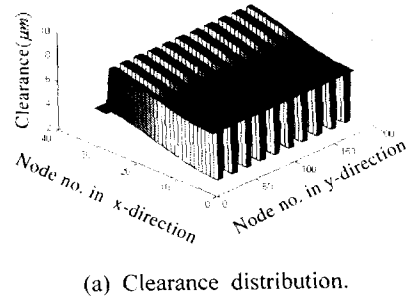


Fig. 5 Clearance and pressure distribution of mode 2.

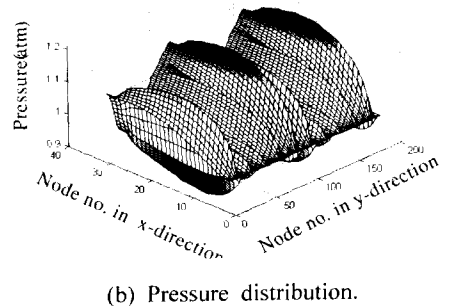
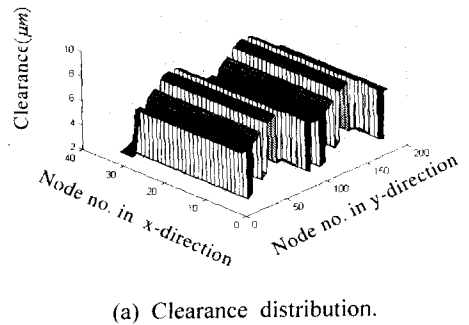


Fig. 6 Clearance and pressure distribution of mode 3.

### 4.2 진구도 오차에 의한 강성변화

각 mode에 대하여 진구도 오차를 0에서 1로 증가시키면서 반경방향의 강성을 구하여 진구도 오차가 강성에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 7은 mode 1과 2의 진구도 오차에 의한 강성의 변화를 보여준다. mode 1의 경우는 진구도 오차가 증가함에 따라서 강성이 감소한다. 이것은 압력분포 그림에서 볼 수 있듯이 상단부에서 진구도 오차가 증가함에 따라서 간극이 커지면서 압력이 감소하기 때문이다. 그리고 mode 2의 경우는 위와 반대로 진구도 오차가 증가하면 상단부에서 간극이 작아져 압력이 증가한다. 그리고 베어링의 형상 때문에 상단부에서의 압력은 주로 반경방향으로 힘을 작용하며, 하단부의 압력은 축방향으로 힘을 상대적으로 더 많이 작용하므로 상단부의 압력 증가는 반경방향의 강성을 크게 증가시키는 역할을 한다.

mode 1과 같은 경우는 진구도 오차가 증가함에 따라 반경방향 강성이 작아지기 때문에 바람직하지 않은 모드이다. mode 2의 경우는 진구도 오차가 증가하면서 강성이 증가한다. 이와 같이, 완전한 구보다 오히려 mode 2와 같이 찌그러진 구가 더 큰 강성을 가질 수 있다는 점은 베어링 구의 제작시 mode 2의 방향으로 오차가 발생하도록 하면 결과적으로 강성은 증가되므로 유리하다고 할 수 있다. 이러한 현상은 실험 결과에서도 확인된 바 있다<sup>(8)</sup>. 그러나 진구도 오차가 너무 커지면 간극이 국소적으로 매우 작은 부분이 생겨서 진동이나 충격에 불안정해 질 수 있다는 점은 유의해야 한다.

Fig. 8은 mode 3의 진구도 오차에 따른 강성변화이다. mode 3은 반경방향으로 일정하지 않은 간극을 가지고 있기 때문에 강성을 측정하는 방향에 따라서 강성이 다르게 나타난다. 이 그림은 x방향으로 늘어나고 y방향으로 줄어든 베어링 구에 대하여 x축 방향으로의 강성(mode 3x)과 y축 방향으로의 강성(mode 3y)을 보여준다.

x방향의 경우는 진구도 오차가 증가하면 강성도 같이 증가하지만, y방향으로는 오히려 감소함을 볼 수 있다. 이것은 진구도 오차가 증가하면 x 방향으로 간극이 작아지나, y 방향으로 간극이 커지기 때문이다. 그리고 반경방향의 경우, mode 3x는 홈에 의한 웨지효과와 반경방향 찌그러짐에 의한 웨지효과를 2중으로 받기 때문에 mode 3y보다 매우 큰 강성을 갖는다.

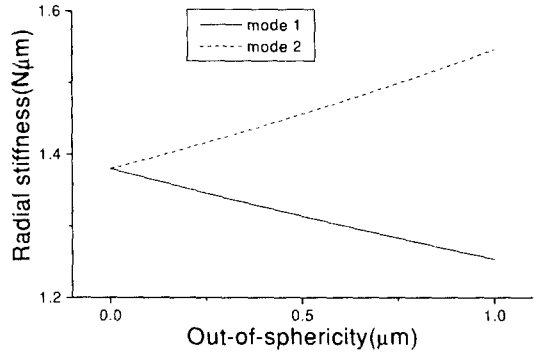


Fig. 7 Radial stiffnesses for modes 1 and 2.

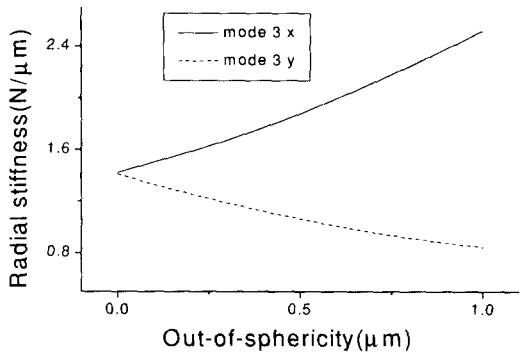


Fig. 8 Radial stiffnesses for mode 3.

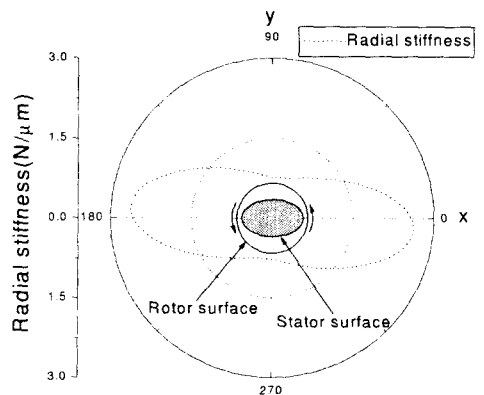


Fig. 9 Radial stiffness for force application direction.

Fig. 9는 mode 3의 경우에서 진구도 오차가 1일 때 원주방향에 따른 강성을 극 좌표계를 이용하여 나타낸 것이다. 가장 큰 값은 간극이 제일 적은 x축 방향보다 좀 더 앞선 지점에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 웨지효과에 의하여 간극이 가장 좁은 곳보다는 좁아지는 곳에서 가장 큰 힘이 발생하기 때문이다. 그리고 y방향으로는 강성이 매우 작은 영역이 생긴다. 따라서 mode 3과 같은 진구도 오차를 가진 베어링을 사용할 경우, 방향성을 고려하여 고정자의 위치를 선정하여야 한다.

### 5. 결론

본 연구에서는 고정자 반구의 진구도 오차가 베어링의 강성에 미치는 영향을 고찰하였다. 진구도 오차로는 3가지 모드를 고려하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 고정자 반구가 축방향으로 길게 찌그러진 경우, 진구도 오차가 커질수록 반경방향 강성이 작아진다.

- 고정자 반구가 축방향으로 짧고, 반경방향으로 지름이 커진 경우, 진구도 오차가 커질수록 반경방향 강성은 오히려 커진다. 그러나 진구도 오차가 지나치게 크면 간극이 매우 작은 부분이 생겨서 진동이나 충격에 약해지는 단점이 있다.

- 고정자 반구가 반경방향으로 찌그러진 경우, 진구도 오차가 커질 때, 반경방향 강성은 힘이 가해지는 방향에 따라서 크게 달라진다.

이와 같은 진구도 오차에 따른 각 모드의 특성에 따라 결정되는 강성의 크기와 방향성 등을 정확히 파악하고, 쓰임에 따라서 허용되는 오차 모드와 오차 범위를 예측하고 제작한다면, 완벽한 구를 가진 베어링을 제작하기 위한 수고와 비용을 줄이면서도 더 좋은 성능을 얻을 수 있다.

### 참고문헌

1. Saito, Y., Makino, H., and Tamura, A., "Characteristics of gas-lubricated spherical spiral groove bearings," Journal of JSLE, Vol. 28, No. 3, pp. 221-227, 1983.
2. Czyzewski, T., and Titus, P., "Analysis of an arbitrarily misaligned self-acting gas film journal

bearing of finite length," Wear, Vol. 114, pp. 367-379, 1987.

3. Bootsma, J., "Spherical and conical spiral groove bearings," ASME J. of Lubrication Technology, pp. 236-249, 1975.
4. Kawabata, N., Ashino, I., Sekizawa, M., and Yamazaki, S., "Spiral grooved bearing utilizing the pumping effect of a herringbone journal bearing," JSME Int. Journal, series III, Vol. 34, No. 3, pp. 411-418, 1991.
5. Murata, S., Miyake, Y., and Kawabata, N., "Exact two-dimensional theory of spherical spiral groove bearings," ASME J. of Lubrication Technology, Vol. 102, 1980.
6. 박근형, 최정환, 최우천, 김권희, 우기명, 김승곤, "나선홈을 갖는 반구형 공기 동압베어링의 반경방향 성능 측정," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 23-30, 1999.
7. 최우천, 신용호, 최정환, "나선홈을 가진 공기 동압 베어링의 곡률에 대한 압력분포," 1999 추계 정밀공학회 발표논문집, pp. 870~873, 1999.
8. Woo Chun Choi, Keun Hyung Park, Jung Hwan Choi, Kwonhee Kim, and Byung Chun Koh, "Study on the Performance of Spiral-Grooved Semi-Spherical Air Bearings Using Taguchi Method," JSME International Journal Series C, Vol. 43, No. 1, 2000.
9. Patankar, S., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill, pp. 52-54, 1980.
10. Patankar, S., Sparrow, E., "Fully developed Flow and Heat Transfer in Duct Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-sectional Area," Trans. of the ASME, Vol. 99, pp. 180-186, 1977.
11. 최우천, 신용호, 최정환, "다양한 곡률을 가진 공기 동압베어링의 축방향 부하특성 해석," 한국정밀공학회지, 제17권 제3호, pp. 129-135, 2000.