

## 이중범프 공기포일베어링의 성능시험

김영철\* · 이동현\* · 김경웅\*

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부,  
\*한국과학기술원 기계항공시스템학부

### Performance Test of Double-Bumped Air Foil Bearings

Young-Cheol Kim<sup>†</sup>, Dong-Hyun Lee\* and Kyung-Woong Kim\*\*

System Eng. KIMM

\*School of Mech & Aero. Eng., KAIST

(Received December 27, 2008; Revised February 20, 2009; Accepted February 23, 2009)

**Abstract** – This paper presents a experimental results for the performance evaluation of a double-bumped air foil bearing. The test results of a double-bumped AFB is compared with a single-bumped AFB at a heavily-loaded condition. The diameter of the test bearing is 50 mm, and the axial length is 50 mm. Nominal clearance of the single-bumped AFB is evaluated as 105  $\mu\text{m}$ , and that of the double-bumped AFB is as 95  $\mu\text{m}$ . The test of the AFBs are demonstrated at 3 test mode; the load variation mode, the speed variation mode, and start-stop mode. The single-bumped AFB demonstrated a upward load-carrying capacity of 95 N and a downward load-carrying capacity of 130 N at 20,000 rpm. The double-bumped AFB demonstrated a upward load-carrying capacity of 170 N and a downward load-carrying capacity of 170 N at 20,000 rpm. The single-bumped AFB demonstrated a downward lift-off speed of 16,300 rpm at 105 N. The double-bumped AFB demonstrated a downward lift-off speed of 15,400 rpm at 105 N. The start-stop test of the AFBs assure 5,000 cycle endurance life. The test results are compared with the theoretical calculation results. The test and theoretical results show that a double-bump air foil bearing provides a higher load-carrying capacity, stiffness and damping than a single-bump air foil bearing in a heavily-loaded condition.

**Keywords** – foil bearings(포일베어링), load-carrying capacity(부하지지능력), lift-off speed(부상속도)

### 1. 서 론

공기포일베어링(이하 AFB)은 기본적으로 공기를 이용한 동압베어링의 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, 기

계적 가공오차 등에 대한 적응성을 높임으로써 사용하기에 편리하다.

1960대 AFB가 처음으로 개발되었고, 다엽형에 비해 범프형 AFB의 부하지지능력이 우수하다는 것이 알려진 1980년대 이후에는 주로 범프형 AFB에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Heshmat[1]은 범프형 AFB에 대한 탄성유체윤활해석을 처음으로 제시하였다. Peng과 Carpino[2-3]은 섭동법을 이용하여 단일범프 AFB의 강성 및 감쇠계수를 계산하는 방법을 제안하였다. Heshmat[4]은 범프포일을 이중으로 겹친 이중범프 AFB가 부하지지능력, 감쇠 및 안정성을 크게 향상시킬 수 있음을 실험적으로 보였다. Delacorte[5]는 범프포일의 형상

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : kyc@kimm.re.kr

을 바꿔가며 AFB의 하중지지능력을 측정하였으며, 이중범프 AFB를 부하지지능력이 우수한 3세대 베어링으로 분류하였다. Heshmat[6]은 이중범프 AFB에서 운전되는 유연축(flexible shaft)이 유연축 공진 영역을 통과하여 운전될 수 있음을 실험적으로 보였다. Kim[7-9]은 마찰을 고려하여 단일범프 및 이중범프 AFB의 정적 및 동적 성능을 해석하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 이중범프 AFB의 성능을 확인하기 위해 시험장치를 구성하고, 부하지지능력과 부상속도를 측정하고자 한다. 그리고 단일범프 AFB에 대한 성능과 비교하고자 한다.

## 2. 이중범프 AFB 제작

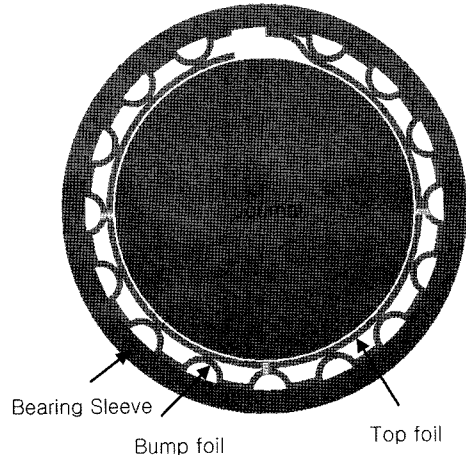
### 2-1. AFB 구조

Fig. 1은 단일범프 AFB와 이중범프 AFB의 구조를 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 단일범프 AFB는 한 개의 범프포일과 탑포일로 구성되어지며, 범프포일과 탑포일의 한쪽 끝부분은 고정되어 있고, 다른 한쪽 끝 부분은 자유로운 상태로 있게 된다. 이에 반해 이중범프 AFB는 Fig. 1(b)와 같이 두 개의 범프포일이 포개어져서 탑포일과 함께 한쪽부분이 고정되고 다른 한쪽 끝부분이 자유로운 상태로 있게 된다.

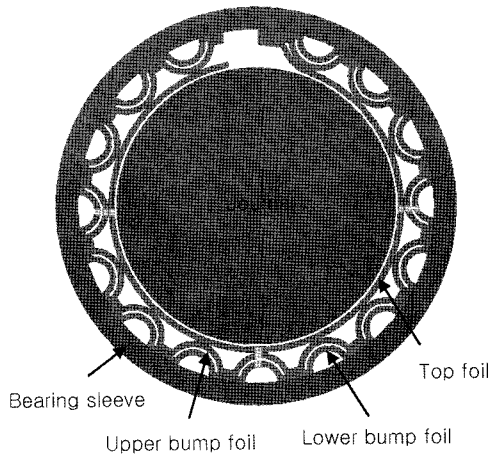
이중범프 AFB는 저하중이 작용하거나 작은 외란이 작용하는 경우 상위 범프에 의해서 하중을 지지하며, 고하중이 작용하는 경우에는 두 개의 범프가 함께 작용하면서 더 큰 강성과 감쇠를 제공하게 된다. 상위범프만 작동하는 곳을 단일범프 작동영역(single bump active region)이라 하고, 상위범프와 하위범프가 함께 작동하는 곳을 이중범프 작동영역(double bump active region)이라 한다.

### 2-2. AFB 제작

제작된 AFB는 직경이 50 mm, 길이가 50 mm, 간극(clearance)이 0.05 mm이다. 범프의 소재는 SUS304로 제작하였으며, 탑포일의 표면을 Teflon 코팅 처리하였다. Fig. 2는 범프의 형상을 나타낸다. 단일범프포일의 반호길이가 0.9 mm, 높이가 0.398 mm, 두께가 0.06 mm, 피치를 3.076 mm로 제작되었다. 이중범프포일 중 상위범프의 반호길이는 1.0 mm, 높이가 0.331 mm, 두께가 0.051 mm, 피치를 3.001 mm로 제



(a) Single-bumped AFB



(b) Double-bumped AFB

Fig. 1. Structure of AFB.

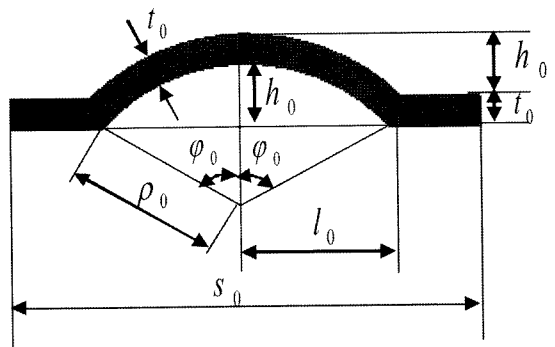


Fig. 2. Geometry of a bump.

작되었다. 이중범프포일 중 하위범프의 반호길이는

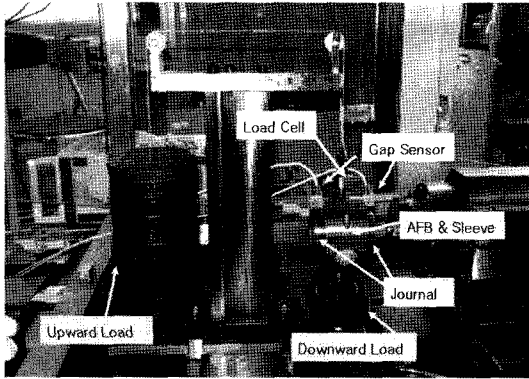


Fig. 3. Sway space test rig.

0.9 mm, 높이가 0.297 mm, 두께가 0.08 mm, 피치를 3.001 mm로 제작되었다. 따라서 단일범프 AFB의 공칭간극은 105  $\mu\text{m}$ 로 추정하였으며, 이중범프 AFB의 공칭간극은 96  $\mu\text{m}$ 로 추정하였다.

Fig. 3은 흔들림공간(sway space)을 측정하기 위한 실험장치 사진이다. 베어링 슬리브의 아래방향과 윗방향으로 하중을 가하면서 베어링의 양쪽 측면에서 저널과의 상대변위를 측정하였다. Fig. 2.17은 단일범프 AFB와 이중범프 AFB에 대하여 흔들림공간 시험을 통해 얻은 하중-변위곡선을 나타낸다.

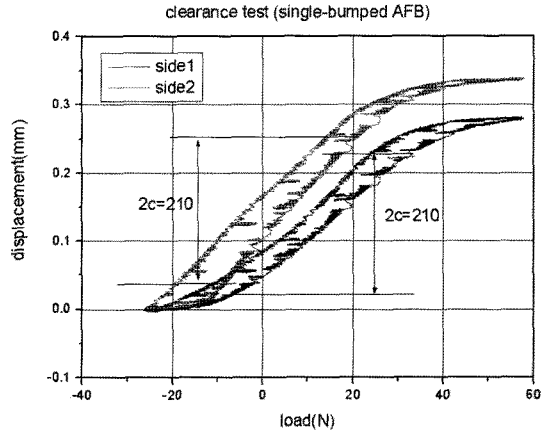
### 3. AFB 성능 시험장치

#### 3-1. 시험장치

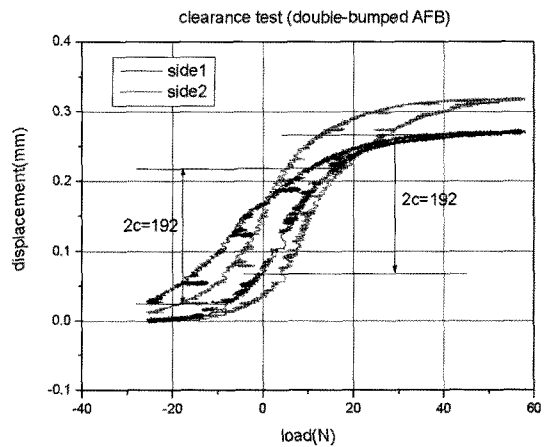
Fig. 5.2~5.3은 시험장치 사진을 나타낸 것이다. 고속으로 회전시키면서 동시에 베어링에 정적인 하중을 가할 수 있도록 되어 있고, 이 때의 토크를 측정함으로써 부하특성을 얻을 수 있도록 설계되었다. 스피너는 최고 60,000 rpm까지 구동할 수 있다. 베어링에 수직방향으로 최고 30 kg까지 부하를 가할 수 있으며 로드셀을 통하여 하중을 측정하였다. 베어링 하우징 하단에 토크바(torque bar)를 설치하여, 저널이 회전하면서 AFB에 전달되는 토크를 로드셀을 통해 측정하였다. 회전속도는 피이버 광센서와 주파수-전압변환기를 이용하여 측정하였다. 측정된 신호들은 DAQ 보드를 통해 컴퓨터에 저장하였다.

#### 3-2. 시험방법

베어링의 성능시험을 위한 운전모드는 크게 3가지로 나눌 수 있다.



(a) single-bumped AFB



(b) Double-bumped AFB

Fig. 4. Sway space test result.

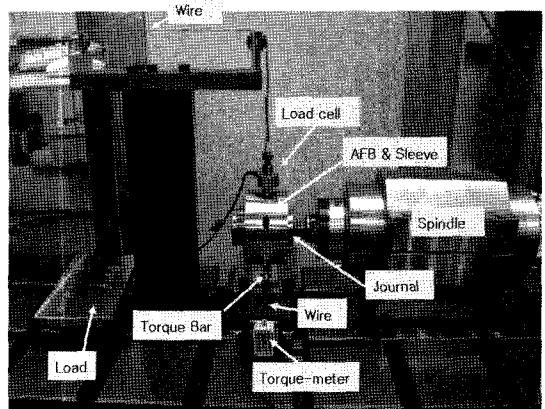


Fig. 5. AFB test-rig.

(a) 하중 변동 시험 모드

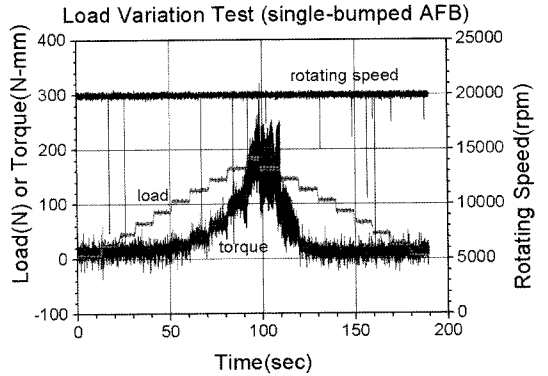
이 시험은 일정한 회전속도에서 하중을 변화시키면서 AFB의 부하지지능력(load-carrying capacity)를 측정하는 모드이다. 일정 회전속도에서 하중을 증가시키거나 감소시키면서 AFB의 토크를 측정하게 된다. 부하지지능력이란 일정한 회전속도에서 공기유향상태를 유지하는 최대하중으로 정의할 수 있다. 실제로 실험을 통해서서는 분명한 공기유향상태를 보이는 하중 범위에서의 평균토크치의 200%를 넘어서게 되는 하중을 그 속도에서의 부하지지능력이라고 평가하기로 한다.

(b) 회전속도 변동 시험 모드

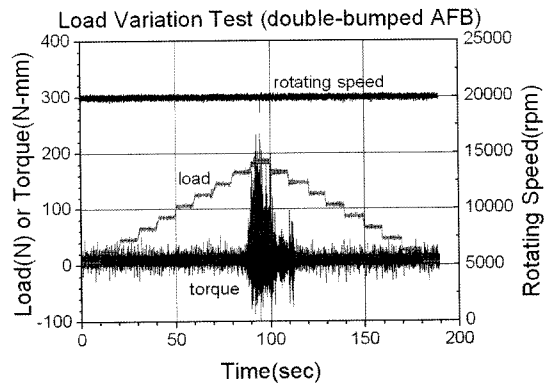
이 시험은 일정한 하중이 주어진 상태에서 회전속도를 변화시키면서 부상속도(lift off speed)를 측정하는 모드이다. 일정 하중이 주어진 상태에서 회전속도를 감소시키면서 AFB의 토크를 측정하게 된다. 부상속도란 일정한 하중에서 공기유향상태를 유지하는 최소운전속도로 정의할 수 있다. 실제로 실험을 통해 분명한 공기유향상태를 보이는 운전속도 범위에서의 평균토크치의 200%를 넘어서게 되는 회전속도를 그 하중에서의 부상속도라고 평가하기로 한다.

(c) 기동-정지 시험 모드

이 시험은 정해진 하중을 부가한 상태에서, 회전축을 정해진 회전속도까지 상승-유지-하강을 반복하면서 토크변동을 측정하는 모드이다. 이상 유무를 확인하면 기동-정지를 반복하게 되면 AFB의 내구성능을 확인할 수 있다.



(a) Single-bumped AFB



(b) Double-bumped AFB

Fig. 6. Torque versus time curve at load variation test mode.

4. AFB 성능 시험결과

4-1. 하중 변동 시험

Fig. 6은 회전속도를 20,000 rpm으로 일정하게 한 후 하중을 약 200 N까지 20 N정도의 간격으로 증가시켰다가 감소시키면서 토크를 측정한 결과이다. Fig. 7은 Fig. 6으로부터 얻은 토크-하중 선도이다. 유체유향영역이라고 판단되는 영역에서의 평균 토크가 10 Nmm 정도로 측정되었으며, 20 Nmm을 기준으로 하여 부하지지능력을 판정하였다. 단일범프 AFB는 하중이 증가할 때 95 N, 하중이 감소할 때 130 N으로 측정되었다. 또 이중범프 AFB는 하중을 증가하거나 감소할 때 모두 170N으로 측정되었다. 이 결과는 이중범프포일베어링의 부하지지능력이 우수하게 된다[8]는 이론 결과

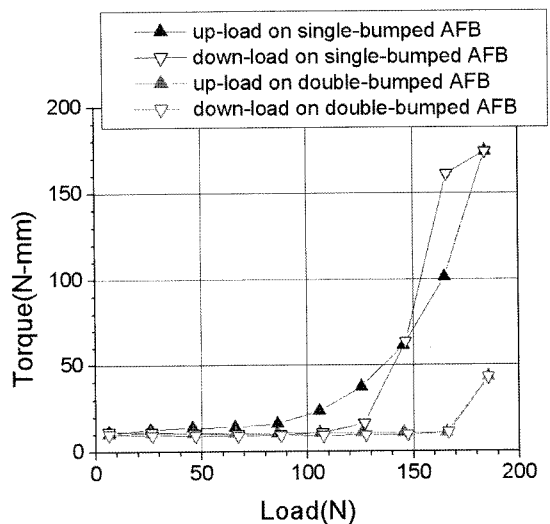
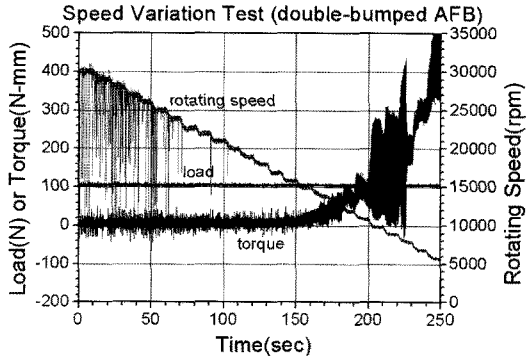
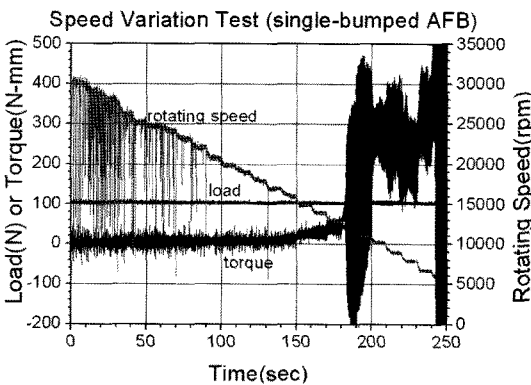


Fig. 7. Torque versus load curve.



(a) Single-bumped AFB



(b) Double-bumped AFB

Fig. 8. Torque versus time curve at speed variation test mode.

를 뒷받침하고 있다.

4-2. 회전속도 변동 시험

Fig. 8은 약 105 N의 하중을 가한 상태에서 저널의 회전속도를 30,000 rpm으로부터 약 1,000 rpm간격으로 감소시키면서 토크를 측정 한 결과이다. Fig. 9는 Fig. 8로부터 얻은 토크-회전속도 선도이다. 유체윤활영역이라고 판단되는 영역에서의 평균 토크가 7.5 Nmm 정도로 측정되었으며, 따라서 이 값의 200%인 15 Nmm을 기준으로 하여 부상속도를 판정하였다. 단일범프 AFB는 약 16,300 rpm이고, 이중범프 AFB는 약 15,400 rpm으로 측정되었다. 이 결과는 이중범프포일베어링의 부상속도가 더 적어 부하지지능력이 우수하게 된다[8]는 이론 결과를 뒷받침하고 있다.

4-3. 기동-정지 시험

Fig. 10에서 보는 바와 같이 20 N의 저하중이 작용

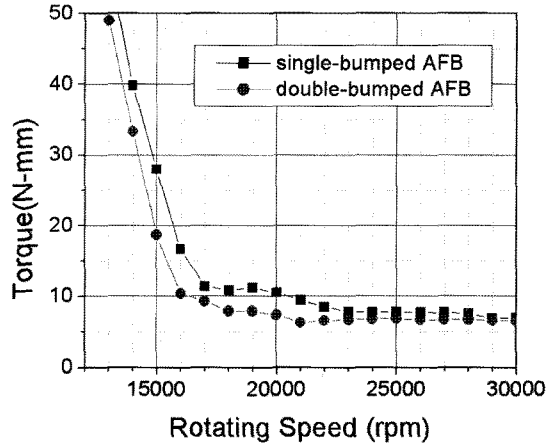


Fig. 9. Torque versus speed curve.

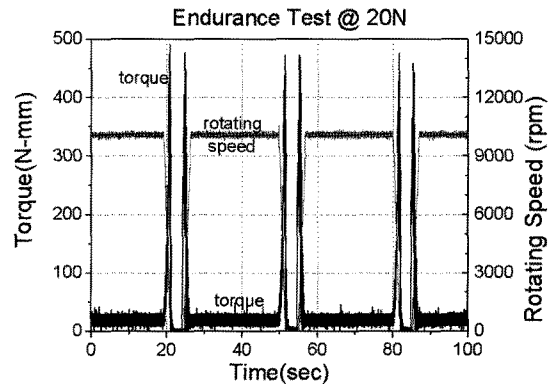


Fig. 10. Start-stop torque curve.

할 때 단일범프 AFB에 대해 10,000 rpm까지 기동-정지를 반복하면서 5,000 cycle 내구성시험을 수행하였다. 기동 및 정지될 때 최대 500 Nmm 정도의 토크가 발생하며, 공기윤활상태로 부상하였을 때 약 15 Nmm 정도의 토크가 발생함을 확인할 수 있다. 기동정지시험후 저널의 표면은 가운데 부분과 베어링 양 끝단과 맞닿은 부분에서 원주방향으로 상흔 자국이 관찰되었다. 베어링의 탑포일 표면은 축방향 양끝단에 원주방향으로 상흔 자국이 관찰되었으며, 하중을 받는 아랫방향에서 탑포일과 범프포일이 접촉하는 지점을 따라 축방향으로 상흔자국이 관찰되었다. 하지만 제조립 후에도 정상적으로 운전됨을 확인하였다.

4. 결 론

이중범프 AFB의 성능시험장치를 구성하여 성능시험

을 수행하였다. 하중 변동 시험을 통해 부하지지능력을 측정하였으며, 속도 변동 시험을 통해 부상속도를 측정하였다. 두 베어링에 대하여 20,000 rpm에서 부하지지능력을 측정된 결과, 단일범프 AFB는 하중이 증가할 때 95 N, 하중이 감소할 때 130 N으로 측정되었다. 또 이중범프 AFB는 하중을 증가하거나 감소할 때 모두 170 N으로 측정되었다. 또 두 베어링에 대하여 105 N에서 부상속도를 측정된 결과, 단일범프 AFB는 약 16,300 rpm이고, 이중범프 AFB는 약 15,400 rpm으로 측정되었다. 5,000 cycle 기동 정지 시험을 통해 내구성을 확보하였다. 결과적으로 이중범프 AFB는 단일범프 AFB에 비해서 고하중을 받을 때 부하지지능력이 커지게 됨을 실험을 통하여 확인하였다.

### 참고문헌

1. H.Heshmat, J.A.Walowit, O.Pinkus, "Analysis of Gas-Lubricated Foil Journal Bearings" ASME J. Lubrication Technology, pp. 647-655, 1983.
2. J.-P.Peng. M.Carpino, "Calculation of Stiffness and Damping Coefficients for Elastically Supported Gas Foil Bearings", ASME J. Trib., Vol. 115, pp. 20-27, 1993.
3. J.-P.Peng. M.Carpino, "Coulomb Friction Damping Effects in Elastically Supported Gas Foil Bearings", Trib. Trans., Vol. 37, pp. 91-98, 1994.
4. H. Heshmat, "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearing : High Speed and Load Capability", ASME J. Trib., pp. 287-295, 1994.
5. C.DellaCorte, M.J.Valco, "Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearing for Oil-Free Turbomachinery Applications", Trib. Trans., Vol. 43, pp. 795-801, 2000.
6. Hooshang Heshmat, "Operation of Foil Bearings Beyond the Bending Critical Mode", Journal of Tribology, pp. 192-198, 2000.
7. 김영철, 이동현, 김경웅, "공기포일베어링의 성능에 미치는 범프마찰효과", 한국윤활학회지, Vol. 21, No. 6, pp. 283-288, 2005.
8. 김영철, 이동현, 김경웅, "이중범프포일 공기베어링의 성능해석", 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 3, pp. 123-129, 2007.
9. 김영철, 이동현, 김경웅, "이중범프포일 공기베어링의 성능에 미치는 마찰효과", 한국윤활학회지, Vol. 23, No. 4, pp. 162-169, 2007.