

## 이중범프포일 공기베어링의 성능에 미치는 마찰효과

김영철<sup>†</sup> · 이동현\* · 김경웅\*\*

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부, \*한국과학기술원 기계항공시스템학부 대학원,  
\*\*한국과학기술원 기계항공시스템학부

### Friction Effects on the Performance of Double-Bumped Air Foil Bearings

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

System Eng. KIMM, kyc@kimm.re.kr),

\*School of Mech & Aero. Eng., KAIST, dhyun@kaist.ac.kr),

\*\*School of Mech & Aero. Eng., KAIST, taeho@kaist.ac.kr)

**Abstract** – This paper deals with friction effects on the performance of double-bumped AFBs. The stiffness and damping coefficients of the double bump vary depending on the external load and its friction coefficient. The double bump can be either in the single or double active region depending on vertical deflection. The equivalent stiffness and damping coefficients of the bump system are derived from the vertical and horizontal deflection of the bump, including the friction effect. A static and dynamic performance analysis is carried out by using the finite difference method and the perturbation technique. The results of the performance analysis for a double-bumped AFB are compared with those obtained for a single-bumped AFB. This paper successfully proves that a double bumped AFB has higher load capacity, stiffness, and damping than a single-bumped AFB in a heavily loaded condition.

**Key words** – Foil bearings(포일베어링); Load carrying capacity(부하지지능력), EHL(탄성유체윤활)

## 1. 서 론

최근 터보기계류는 고속화, 경량화, 단순화되어 감에 따라 유막베어링 대신으로 공기포일베어링(이하 AFB)을 사용하는 경우가 늘어나고 있다. 보통 터보기계에서 많이 사용하는 유막베어링은 공기에 비해 상대적으로 점도가 높은 기름을 사용함으로써 베어링에서의 동력손실이 크고 윤활순환시스템으로 인해 구조가 아주 복잡해진다. 또한 가끔 오일의 밀봉(sealing) 문제를 일으키기도 하는데, 심한 경우 연소실로 윤활유가 새어 나가 불이 붙는 경우도 발생한다. 이러한 곳에 AFB를 사용할 경우 밀봉문제가 해결되고 구조가 단순해지며, 동력이 20%이상 향상되는 것으로 보고되고 있다.

AFB은 포일의 구조변경 및 고온 고체마찰제의 개발로 점점 부하지지능력과 감쇠력이 향상되는 방향으로 발전하고 있다. Heshmat[1]은 범프포일을 이중으로 겹친 이중범프 AFB가 부하지지능력, 감쇠 및 안정성을 크게 향상시킴을 실험적으로 보였다. Heshmat[2]은 이중범프 AFB에서 운전되는 유연축(flexible shaft)이 유연축 공진 영역을 통과하여 운전될 수 있음을 실험적으로 보였다. Dellacorte[3]는 이중범프포일 AFB를 부하지지능력이 우수한 3세대 베어링으로 분류하였다.

Kim[4]은 마찰을 고려하여 단일범프포일의 변형 운동방정식을 유도하고, 이를 바탕으로 단일범프 AFB의 정적 및 동적 성능을 해석하는 방법을 제시한 바 있다. 또한 Kim[5]은 이중범프포일의 변형 운동방정식을 유도하고, 이를 바탕으로 이중범프포일 공기베어링의 정적 및 동적 성능을 해석하는 방법을 제시한 바 있다.

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

본 연구에서는 이중범프포일에 작용하는 마찰효과를 해석을 통해 고찰해 봄으로써, 향후 이중범프 AFB의 설계에 유용하게 활용할 수 있도록 하고자 한다.

## 2. 해석 이론

### 2-1. 지배방정식

등온, 등점성의 이상기체를 작동유체로 하는 AFB에 관한 무차원 레이놀즈방정식(dimensionless Reynolds equation)은 공기막내의 압력발생을 묘사한다.

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

실제로는 탑포일이 범프포일로부터 떨어질(lift-off) 수 있기 때문에 음압(sub-ambient pressure)은 발생하지 않으며, 양압(super-ambient pressure)은 레이놀즈 경계조건을 만족하는 임의의 각위치  $\theta_r$ 에서 끝이 난다. 따라서 식 (1)의 해를 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$(a) P=1, \partial P / \partial \theta = 0 \text{ at } \theta > \theta_r$$

$$(b) P=1 \text{ at } \xi = \pm(L/2R)$$

식 (1)에서 무차원 공기막 두께는 편심률과 탑포일의 수직변형에 의해 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$H = 1 + \epsilon \cos(\theta - \phi) + U \quad (2)$$

포일의 등가 변형방정식은 질량이 없는 1자유도 스프링-댐퍼 시스템으로 묘사할 수 있다.

$$P = K_b U + C_b \dot{U} \quad (3)$$

### 2-2. 단일범프의 변형모델

Fig. 1은 단일범프의 기하학적 형상과 자유물체도를 나타낸다. 마찰력을 고려한 범프의 변형은 다음과 같이 표현되어진다.

$$U = \alpha_u P \quad (4)$$

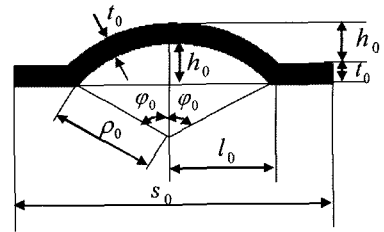
$$V = \alpha_v P \quad (5)$$

여기서

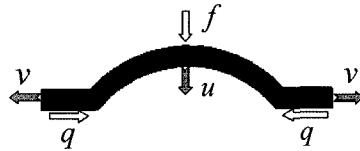
$$\alpha_u = \frac{\rho_0 W_0 s_0 p_a (I_1 - \mu I_2)}{2EIc} \quad (6)$$

$$\alpha_v = \frac{\rho_0 W_0 s_0 p_a (I_2 - \mu I_3)}{2EIc} \quad (7)$$

단일범프에서의 등가 강성계수와 감쇠계수는 다음과



(a) Geometry



(b) free body diagram

Fig. 1. Structural model of a single bump.

같이 구할 수 있다.

$$K_b = \frac{\Delta P}{\Delta U} \quad (8)$$

$$C_b = \frac{4\Delta Q \Delta V}{\pi \omega (\Delta U)^2} \quad (9)$$

따라서 단일범프포일의 강성 및 감쇠계수는 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$K_b = \frac{1}{\alpha_u} \quad (10)$$

$$C_b = \frac{2\mu \alpha_v}{\pi \omega \alpha_u^2} \quad (11)$$

### 2-3. 이중범프의 변형모델

이중범프는 하중의 크기에 따라  $u_u \leq \Delta h$ 인 단일범프 작동영역(the single active region)과  $u_u > \Delta h$ 인 이중범프 작동영역(the double active region)으로 구분할 수 있다.

이중 범프의 경우에도 강성계수는 상위범프의 변형량에 의해 감쇠계수가 결정되어지므로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$K_b = \frac{\Delta P}{\Delta U''} \quad (12)$$

또한 감쇠계수는 상위범프와 하위범프간의 상대마찰력과 하위범프와 슬리브 사이의 마찰력을 고려하므로 다음과 같이 계산할 수 있다.

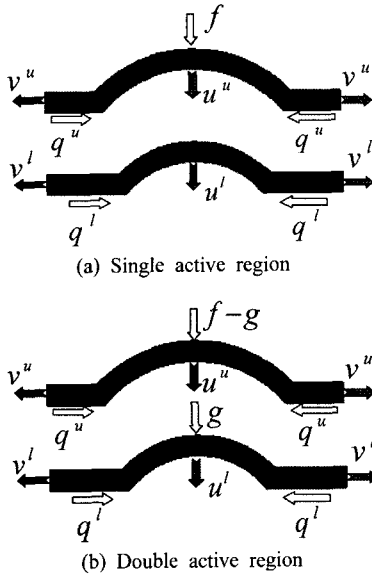


Fig. 2. Structural model of a double bump.

$$C_b = \frac{4(\Delta Q^u \Delta(V^u - V^l) + \Delta Q^l \Delta V^l)}{\pi \omega (\Delta U^u)^2} \quad (13)$$

2-3-1. 단일범프작동영역(Single Active Region)

Fig. 2(a)는 단일범프작동영역에 있는 이중 범프의 자유물체도를 나타낸다. 만약 범프에 작용하는 모든 마찰력이 인 경우에 범프의 변형은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$U^u = \alpha_u^u P \quad (14)$$

$$V^u = \alpha_u^u P \quad (15)$$

$$U^l = V^l = 0 \quad (16)$$

따라서 이 경우에는 상위범프만 변형을 하게 됨을 알 수 있다. 이 영역에서 강성 및 감쇠계수는 식 (12)와 (13)에 의해 다음과 같이 된다.

$$K_b = \frac{1}{\alpha_u^u} \quad (17)$$

$$C_b = \frac{2\mu\alpha_v^u}{\pi\omega\alpha_u^{u2}} \quad (18)$$

즉 이 영역에서 일 때 다음 식이 성립한다.

$$K_b = K_b^u \quad (19)$$

$$C_b = C_b^u \quad (20)$$

즉, 이 경우에 상위범프만 유효하게 작동하게 됨을 알 수 있다.

2-3-2. 이중범프작동영역(Double Active Region)

Fig. 4(b)는 이중범프작동영역에 있는 이중 범프의 자유물체도를 나타낸다. 두 범프 사이의 높이차(height difference)는 다음과 같다.

$$\Delta H = U^u - U^l \quad (21)$$

$\mu = \mu_1 = \mu_2$ 라고 가정하고 식 (21)을 이용하면, 범프의 꼭대기에서 발생하는 접촉력(contact force)은 다음과 같이 계산되어진다.

$$G = \frac{\alpha_u^u P - \Delta H}{\alpha_u^u + \alpha_u^l} \quad (22)$$

따라서 이 영역에서의 범프의 변형은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$U^u = \frac{\alpha_u^u \alpha_u^l P_i + \alpha_u^u \Delta H}{\alpha_u^u + \alpha_u^l} \quad (23)$$

$$V^u = \frac{\alpha_u^u \alpha_u^l P_i + \alpha_u^u \Delta H}{\alpha_u^u + \alpha_u^l} \quad (24)$$

$$U^l = \frac{\alpha_u^u \alpha_u^l P_i - \alpha_u^l \Delta H}{\alpha_u^u + \alpha_u^l} \quad (25)$$

$$V^l = \frac{\alpha_u^u \alpha_u^l P_i - \alpha_u^l \Delta H}{\alpha_u^u + \alpha_u^l} \quad (26)$$

이 영역에서 범프의 강성 및 감쇠계수는 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$K_b = \frac{\alpha_u^u + \alpha_u^l}{\alpha_u^u \alpha_u^l} \quad (27)$$

$$C_b = \frac{2\mu(\frac{\alpha_v^u}{\alpha_u^{u2}} - \frac{\alpha_v^l}{\alpha_u^{l2}} + \frac{\alpha_v^l}{\alpha_u^u \alpha_u^l})}{\pi\omega} \quad (28)$$

즉, 이 영역에서 인 경우에는 상위범프와 하위범프가 병렬 스프링과 같이 작동하여 다음 식을 만족함을 확인할 수 있다.

$$K_b = K_b^u + K_b^l \quad (29)$$

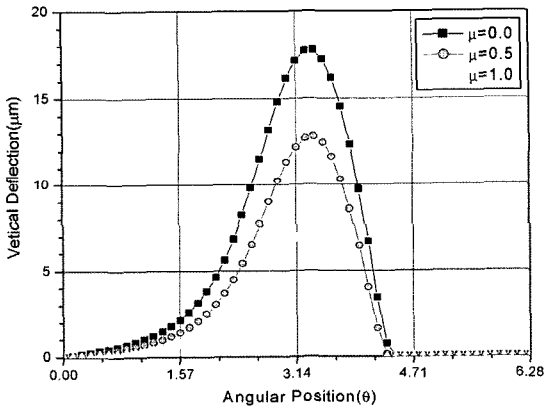
3. 성능 해석

3-1. 베어링 해석모델

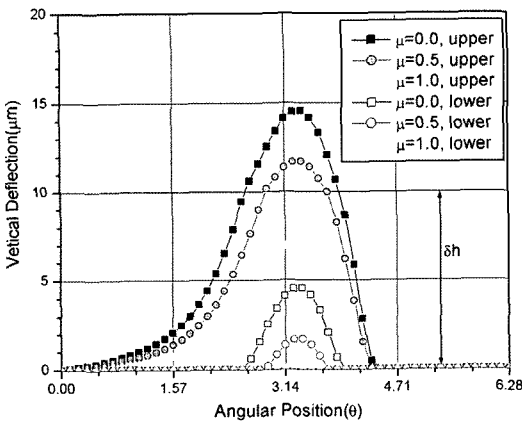
단일범프 AFB와 이중범프 AFB에 대해 성능해석을 수행하였다. 두 베어링의 직경이 50 mm, 길이가 50 mm, 간극(clearance)이 0.05 mm인 경우로 가정하였으

며, 100 N의 축하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 공기의 점성은  $1.789 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ , 공기의 밀도는  $1.225 kg/m^3$ 로 가정하였다. 범프의 소재는 SUS304로 가정하고, 범프의 영계수(Young's modulus)를  $2 \times 10^{11} N/m^2$ , 프와송비(Poisson's ratio)를 0.25로 두었다.

단일범프포일인 경우, 범프의 반호길이(half length)를 1 mm, 높이를 0.5 mm, 두께를 0.05 mm, 피치를 3 mm로 가정하였다. 이중범프포일 중에서 상위범프의 경우 단일범프의 경우와 동일한 치수를 가지는 것으로 가정하였다. 이중범프포일 중에서 하위범프의 경우, 범프의 반호길이(half length)를 0.98 mm, 높이를 0.49 mm, 두께를 0.05 mm, 피치를 3 mm로 가정하였다. 따라서 두 범프의 높이차를 0.01 mm로 가정하였다.



(a) Single-bumped AFB



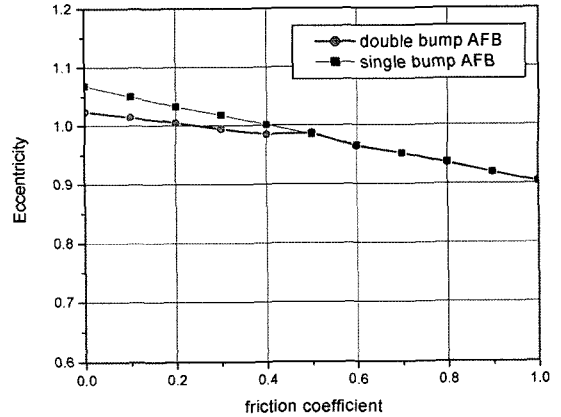
(b) Double-bumped AFB

Fig. 3. Vertical deflection according to the center line of the AFBs.

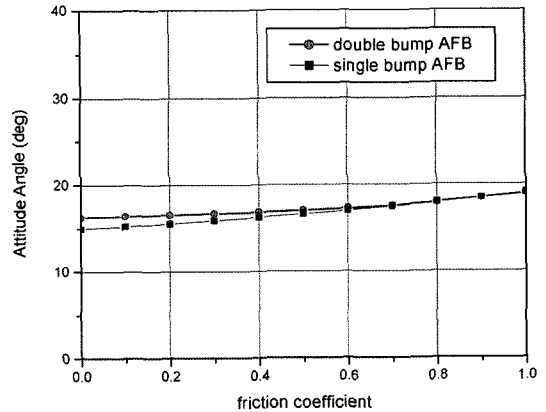
### 3-2. 마찰계수 변화에 따른 성능특성

#### 3-2-1. 베어링의 정적 특성

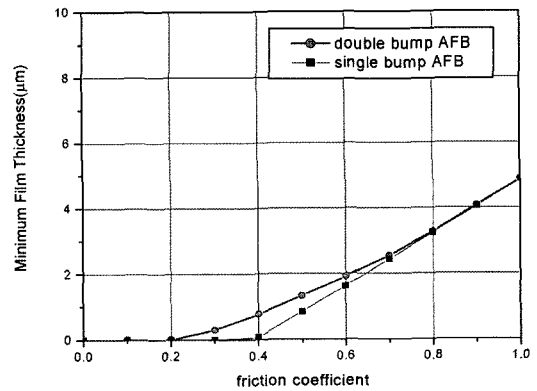
단일범프 AFB와 이중범프 AFB에 대하여, 100 N의



(a) Eccentricity



(b) Attitude angle



(c) Minimum film thickness

Fig. 4. Friction effects on static performances of the AFBs.

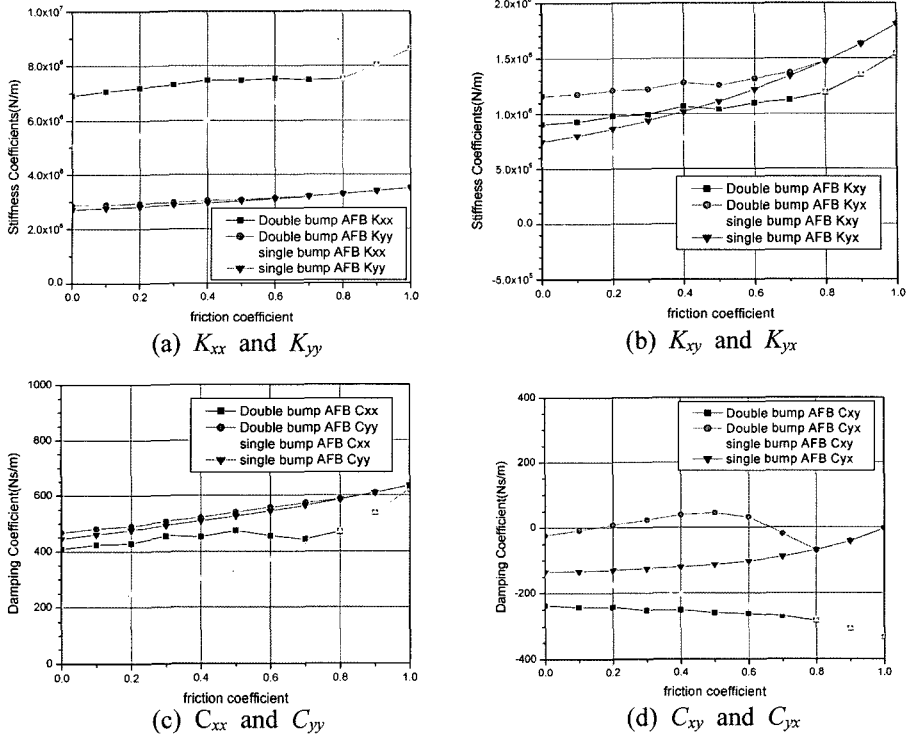


Fig. 5. Friction effects on stiffness and damping coefficients of the AFBs.

부하가 작용하고 20,000 rpm으로 회전할 때 마찰계수를 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 3은 축방향 중심선을 따르는 수직방향 변형량을 그린 것인데, 마찰계수가 0.0일 때와 0.5일 때 이중범프 AFB는 이중범프 작동영역에 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 마찰계수 변화에 대한 두 AFB의 정적 성능을 나타낸다. 마찰계수가 0.7 이하인 경우, 이중범프 AFB의 편심률이 단일범프 AFB의 경우보다 더 작고, 이중범프 AFB의 자세각은 단일범프 AFB의 경우보다 더 크게 되며, 이중범프 AFB의 최소유막두께는 단일범프 AFB의 경우보다 더 크게 된다. 그러나 마찰계수가 0.8 이상으로 크게 되면 이중범프 AFB의 편심률, 자세각, 최소유막두께는 단일범프 AFB의 경우와 동일하다. 따라서 마찰계수가 작은 이중범프 AFB에 큰 부하가 작용할 경우, 베어링은 이중범프작동영역에서 거동하게 되고 단일범프 AFB의 경우보다 더 큰 부하지능력을 제공하게 됨을 확인할 수 있다.

3-2-2. 베어링의 동적 특성

Fig. 5는 100 N의 부하가 작용하고 회전속도가 20,000 rpm일 때 마찰계수 변화에 대한 강성계수와 감쇠계수를 그린 것이다. 하중방향의 직강성계수( $K_{xx}$ )가

하중에 수직방향의 직강성계수( $K_{yy}$ )보다 큰 값을 가짐을 볼 수 있으며, 하중방향의 직감쇠계수( $C_{xx}$ )는 하중에 수직방향의 직감쇠계수( $C_{yy}$ )보다 더 작은 값을 가짐을 볼 수 있다. 이들 직강성계수( $K_{xx}, K_{yy}$ )와 직감쇠계수( $C_{xx}, C_{yy}$ )는 마찰계수가 증가함에 조금씩 증가하는 경향을 보인다.

마찰계수가 0.7보다 작은 경우는 이중범프작동영역에서 움직이게 되므로, 이중범프 AFB의 강성 및 감쇠계수는 단일범프 AFB의 경우보다 모두 더 큰 값을 가짐을 볼 수 있다. 하지만 마찰계수가 0.8 이상으로 크게 되면 이중범프 AFB의 강성 및 감쇠계수는 단일범프 AFB의 경우와 동일한 값을 가지며, 이중범프의 효과가 사라지고 단일범프와 동일하게 거동하는 것을 볼 수 있다.

3-3. 회전속도 변화에 따른 성능특성

3-3-1. 베어링의 정적 특성

단일범프 AFB와 이중범프 AFB에 대하여, 100 N의 부하가 작용하고 범프사이의 마찰계수가 모두 0.1이라고 가정할 때 회전속도를 변화시키면서 해석을 수행하였다.

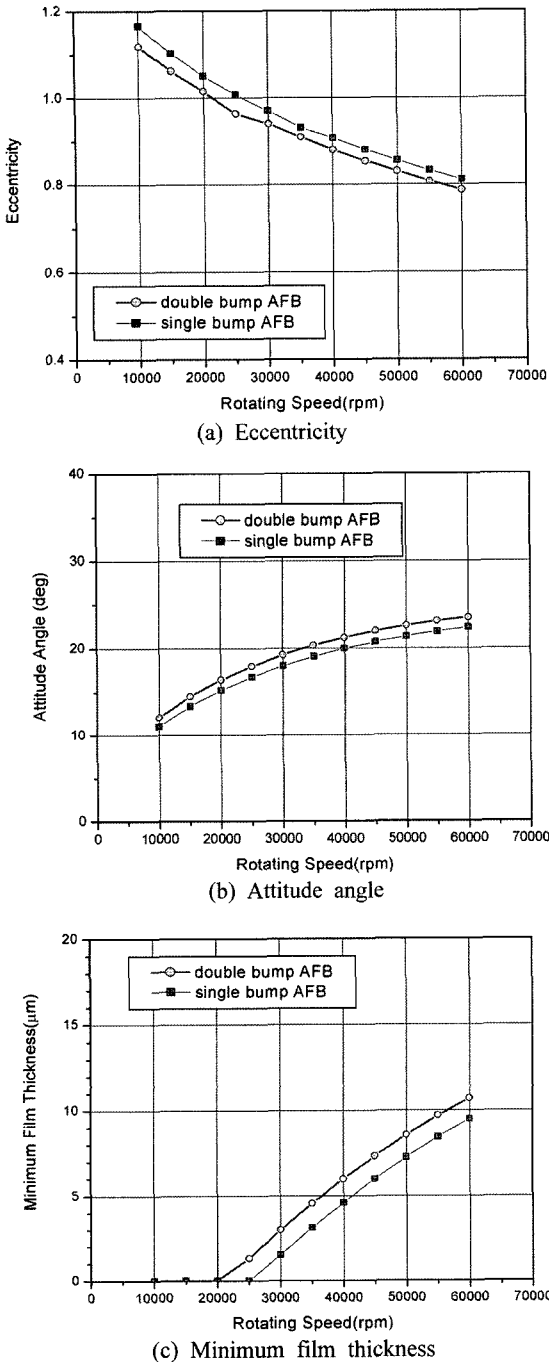


Fig. 6. Rotating speed effects on static performances of the AFBs.

Fig. 6은 두 AFB의 정적 성능을 나타낸다. 이중범프 AFB의 편심률은 단일범프 AFB의 경우보다 더 작고, 이중범프 AFB의 자세각은 단일범프 AFB의 경우

보다 더 크게 된다. 이중범프 AFB의 부상속도(lift-off speed)는 단일범프 AFB의 경우보다 더 작은 속도에서 발생하며, 이중범프 AFB의 최소유막두께도 단일범프 AFB의 경우보다 더 크게 됨을 볼 수 있다. 따라서 이중범프 AFB의 부하지능력이 단일범프 AFB의 경우보다도 더 크다고 할 수 있다.

3-2-2. 베어링의 동적 특성

Fig. 7은 100 N의 하중이 작용할 때 회전속도를 변화시키면서 강성계수와 감쇠계수를 계산한 그림이다. 대체로 하중방향의 직강성계수( $K_{xx}$ )가 하중에 수직방향의 직강성계수( $K_{yy}$ )보다 큰 값을 가짐을 볼 수 있다. 하중방향 직강성계수( $K_{xx}$ )는 하중이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 하중에 수직방향의 직강성계수( $K_{yy}$ )는 하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 한편, 직감쇠계수( $C_{xx}, C_{yy}$ )는 하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 대체로 하중방향의 직감쇠계수( $C_{xx}$ )는 하중에 수직방향의 직감쇠계수( $C_{yy}$ )보다 더 작은 값을 가짐을 볼 수 있다.

하중이 100 N인 경우 이중범프 작동영역에서 움직이게 되므로, 이중범프 AFB의 강성 및 감쇠계수는 단일범프 AFB의 경우보다 모두 더 큰 값을 가짐을 볼 수 있으며, 특히 하중을 받는 방향의 직강성계수( $K_{xx}$ )나 직감쇠계수( $C_{xx}$ ) 값이 상대적으로 많이 커지게 된다. 따라서 축하중이 큰 경우나 외란이 심하게 작용하는 경우에도 이중범프 AFB는 단일범프 AFB에 비해 큰 강성과 감쇠를 제공함으로써 시스템의 안정성을 향상시키는 것으로 기대할 수 있다.

3-2-3. 시스템 동적거동

이중범프 AFB이 시스템의 동특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 Fig. 8과 같은 회전체의 불평형응답특성을 고찰하였다. 회전축은 직경이 60 mm이고 길이가 235 mm인 강철로 되어 있으며, 가운데 3개의 디스크가 배열되어 있다. 디스크의 외경은 180 mm이고 두께는 25 mm이다. 회전체의 총 무게는 20 kg이며, 한쪽 베어링에 작용하는 하중은 각각 10 kg이 된다. 회전축의 최고 회전속도는 60,000 rpm이며, 첫 번째 디스크와 세 번째 디스크가 각각 1 g·mm의 불평형량을 역위상으로 가진다고 가정하여 불평형응답특성을 해석하였다. 이때 해석은 유한요소법에 근거한 회전체동역학 전용 해석틀(XLROTOR)을 이용하였다.

Fig. 9는 수직방향과 수평방향에 대해 계산되어진 불평형 응답을 나타낸다. 회전체 시스템은 8,000 rpm 부근에서 병진 강체모드를 가지는 1차 위험속도를 통과

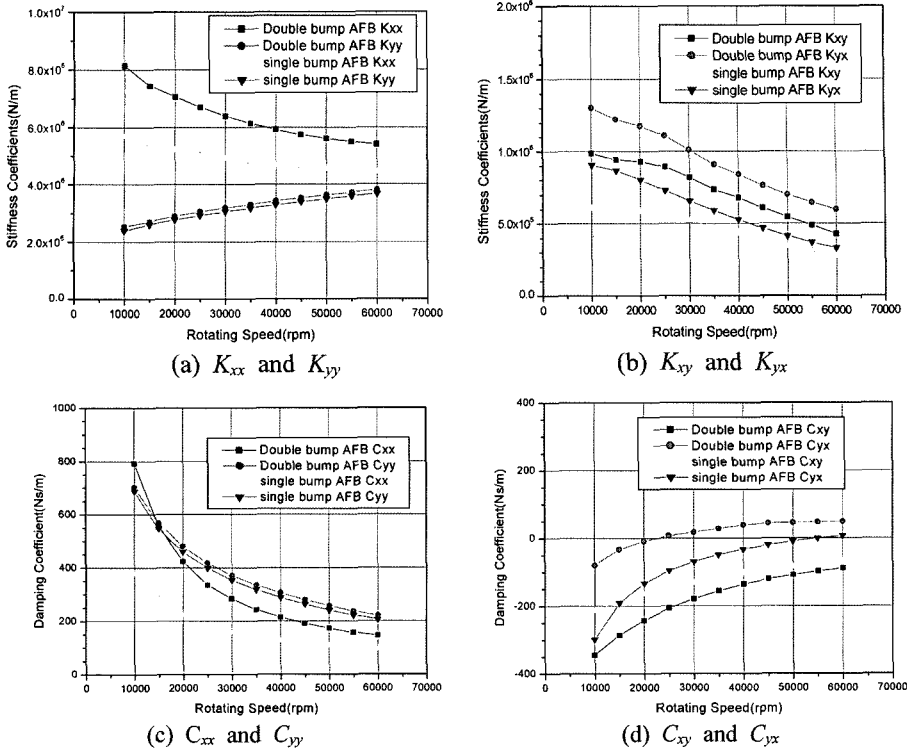


Fig. 7. Rotating speed effects on damping coefficients of the AFBs.

하고, 15,000 rpm 또는 17,000 rpm 부근에서 회전 강제모드를 가지는 2차 위협속도를 통과한다. 이중범프 AFB의 강성계수는 단일범프 AFB의 강성계수보다 더 크기 때문에, 이중범프 AFB를 사용한 경우의 2차 위협속도가 단일범프 AFB를 사용한 경우보다 더 크게 계산되었다. 또한 이중범프 AFB의 감쇠계수가 단일범프 AFB의 감쇠계수보다 더 크기 때문에, 이중범프 AFB를 사용한 경우의 피크 진동치가 단일범프 AFB를 사용한 경우보다 더 작게 계산되었다. 따라서 이중범프 AFB를 채용함으로써 시스템의 안정성이 더욱 향

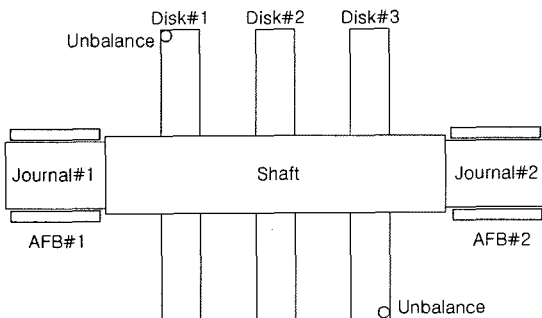


Fig. 8. Rotor model.

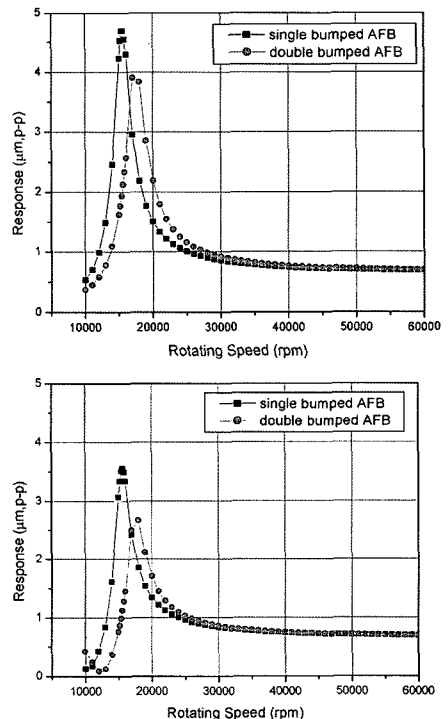


Fig. 9. Imbalance response of the rotor.

상됨을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이중범프 AFB의 성능해석을 위한 이론적 모델을 제시하고, 이를 바탕으로 마찰계수를 변화시키면서 이중범프 AFB의 정적 및 동적성능해석이 수행되었다. 고하중이 작용하는 경우에 마찰력이 적을수록 쉽게 이중범프작동영역에서 거동하게 되고, 단일범프 AFB에 비해 부하지지능력과 강성 및 감쇠를 향상시켜줌으로써 시스템의 안정성을 향상시켜주는 것으로 판단된다. 고하중을 받는 회전체시스템의 불평형응답을 고찰함으로써, 이중범프 AFB를 사용했을 때 공진통과시 진동저감의 효과가 있음을 확인할 수 있다.

#### 참고 문헌

1. H. Heshmat, "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearing : High Speed and Load Capability," ASME J. Trib., pp. 287-295, 1994.
2. Hooshang Heshmat, "Operation of Foil Bearings Beyond the Bending Critical Mode," Journal of Tribology, pp. 192-198, 2000.
3. C.DellaCorte and M.J.Valco, "Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearing for Oil-Free Turbomachinery Applications," Trib. Trans., Vol. 43, pp. 795-801, 2000.
4. 김영철, 이동현, 김경웅, "공기포일베어링의 성능에 미치는 범프마찰효과," 한국윤활학회지, 제21권 제6호 pp. 283-288, 2005.
5. 김영철, 이동현, 김경웅, "이중범프포일 공기베어링의 성능해석," 한국윤활학회지, 제23권 제3호, pp. 123-129, 2007.