

이중범프포일 공기베어링의 성능해석

김영철[†] · 이동현* · 김경웅*

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

*한국과학기술원 기계항공시스템학부

Performance Analysis of Double-Bumped Air Foil Bearings

Young-Cheol Kim[†], Dong-Hyun Lee* and Kyung-Woong Kim*

System Engineering, KIMM

*School of Mechanical, Aerospace & Systems Engineering, KAIST

Abstract – This paper presents a theoretical model for the analysis of double-bumped AFBs. The stiffness and damping coefficients of the double bump vary depending on the external load and its friction coefficient. In the case of a lightly loaded condition where only the upper bump contributes to deformation, the double bump is in the single active region. In the case of a heavily loaded condition where both the upper and lower bumps contribute to deformation, the double bump is in the double active region. So 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(포일 베어링), Load Carrying Capacity(부하지지능력), EHL(탄성유체윤활).

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, 기계적 가공오차 등에 대한 적응성을 높임으로써 사용하기에 편리하다.

1960대 AFB가 처음으로 개발되었고, 다엽형에 비해 범프형 AFB의 부하지지능력이 우수하다는 것이 알려

진 1980년대 이후에는 주로 범프형 AFB에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Walowit[1]등은 단일범프 AFB에 대한 상세설계방법을 처음 제안하였다. Heshmat[2]은 범프형 AFB에 대한 탄성유체윤활해석을 처음으로 시도하였다. 그는 포일의 강성은 윤표면에 일정 상수값으로 균일하게 분포하고 포일의 변형은 오직 그 지점에 작용하는 압력에 비례하여 독립적으로 변형한다고 가정하였다. 즉,

$$U = \alpha_H P \quad (1)$$

여기서, 범프포일의 컴플라이언스(compliance)는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_H = \frac{2S_0 P_0 a_0^2}{Et_0^3 c} (1 - \nu^2) \quad (2)$$

이러한 Heshmat의 모델에서는 마찰력은 0라고 가정

[†]주저자 · 책임저자 : kyc@kimm.re.kr

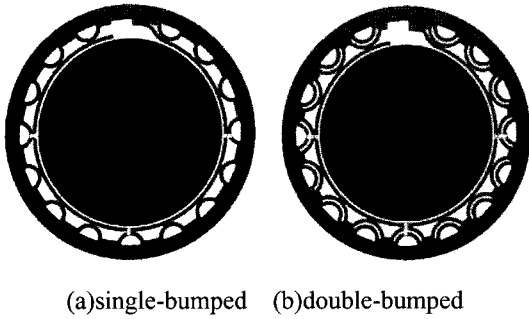


Fig. 1. Structure of AFB.

하여 유도되어졌으며, 현재 가장 널리 이용 되어지는 방법이다. Peng과 Carpino[3-4]은 섭동법을 이용하여 단일범프 AFB의 강성 및 감쇠계수를 계산하는 방법을 제안하였으며, 범프의 쿨롱마찰이 베어링의 강성과 감쇠를 증가시킴을 보였다. Heshmat[5]은 범프포일을 이중으로 겹친 이중범프 AFB가 부하지지능력, 감쇠 및 안정성을 크게 향상시킴을 실험적으로 보였다. Delacorte[6]는 범프포일의 형상을 바꿔가며 AFB의 하중지지능력을 측정하였으며, 이중범프 AFB를 부하지 능력이 우수한 3세대 베어링으로 분류하였다. Heshmat[7]은 이중범프 AFB에서 운전되는 유연축 (flexible shaft)이 유연축 공진 영역을 통과하여 운전될 수 있음을 실험적으로 보였다.

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.

Fig. 2는 이중범프의 기능을 개념적으로 설명한 그림이다. 저하중이 작용하거나 적은 외란이 작용하는 경우 될 때에는 상위 범프에 의해서 하중을 지지하게 되며, 고하중이 작용하는 경우에는 두개의 범프가 함께 작용하면서 더 큰 강성과 감쇠를 제공하게 된다. Fig. 2(b)에 보는 바와 같이 상위범프만 작동하는 때를 단일범프작동영역(single bump active region)에 있다고 정의하고, Fig. 2(c)에 보는 바와 같이 상위범프와 하위범프가 함께 작동하는 때를 이중범프작동영역(double bump active region)에 있다고 정의한다.

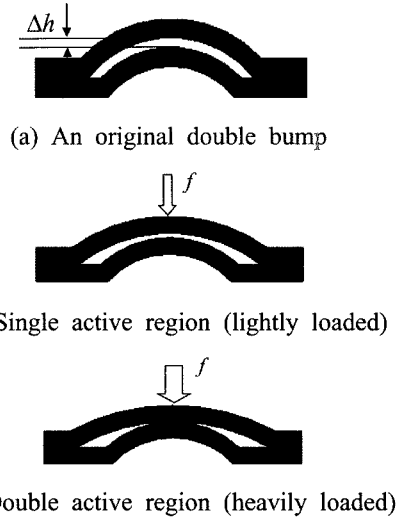


Fig. 2. Mechanism of a double bump.

Kim[8]은 마찰을 고려하여 단일범프포일의 변형 운동방정식을 유도하고, 이를 바탕으로 단일범프포일 공기베어링의 정적 및 동적 성능을 해석하는 방법을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 이와 동일한 방법을 적용하여 이중범프포일의 변형 운동방정식을 유도하고, 이를 바탕으로 이중범프포일 공기베어링의 정적 및 동적 성능을 해석하는 방법을 제시함으로써 이중범프 AFB의 설계에 활용하도록 하고자 한다.

2. 해석 이론

2.1. 지배방정식

AFB의 공기막에 대한 지배방정식은 다음의 레이놀즈 방정식(Reynolds Equation)으로 표현된다.

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

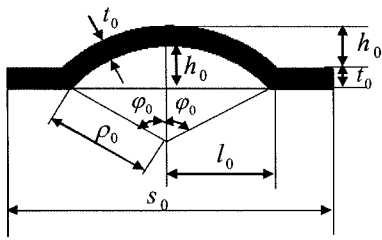
이때 무차원화된 공기막 두께 H는 편심률과 상위범프의 변형에 의해 다음과 같이 표현되어진다.

$$H = 1 + \epsilon \cos(\theta - \phi) + U \quad (4)$$

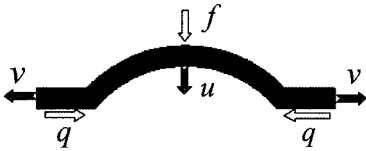
식 (4)에서 범프의 변형에 의한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$P = K_b U + C_b \dot{U} \quad (5)$$

따라서 AFB는 범프의 구조역학적인 거동을 나타내



(a) Geometry



(b) free body diagram

Fig. 3. Structural model of a single bump.

는 식 (5)와 공기역학 거동을 나타내는 식 (3)이 유막 두께와 범프포일의 관계를 나타내는 식 (4)에 의해 서로 연성되어 있는 비선형적 탄성유체유회 거동을 가지게 된다. 식 (3)에 대한 섭동법과 유한차분법을 적용하면 베어링의 정적 및 동적성능을 계산할 수 있다.

2-2. 단일범프의 변형모델

Fig. 3은 단일범프의 기하학적 형상과 자유물체도를 나타낸다. 범프의 변형은 공기막에서의 압력과 수평파찰력에 의해 다음과 같이 기술되어진다.

$$U = \alpha_u P \tag{6}$$

$$V = \alpha_v P \tag{7}$$

여기서

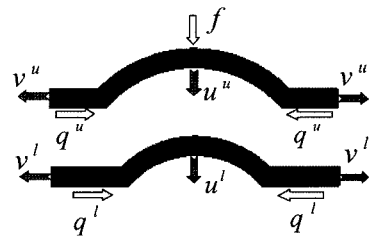
$$\alpha_u = \frac{\rho_0^3 W_0 S_0 P_a (I_1 - \mu I_2)}{2EIc} \tag{8}$$

$$\alpha_v = \frac{\rho_0^3 W_0 S_0 P_a (I_2 - \mu I_3)}{2EIc} \tag{9}$$

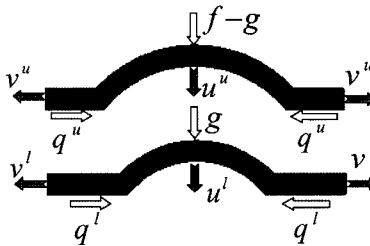
이때 적분상수 \$I_1, I_2, I_3\$은 다음 식으로 주어지며, 항상 양수의 값을 가진다.

$$I_1 = \varphi_0 - 2\sin\varphi_0 + \frac{3}{2}\sin 2\varphi_0 - \frac{1}{2}\varphi_0 \cos 2\varphi_0 \tag{10}$$

$$I_2 = -\frac{1}{4} + \cos\varphi_0 - \frac{3}{4}\cos 1\varphi_0 - \frac{1}{2}\varphi_0 \sin 2\varphi_0 \tag{11}$$



(a) Single active region



(b) Double active region

Fig. 4. Structural model of a double bump.

$$I_3 = \varphi_0 - \frac{3}{4}\sin 2\varphi_0 + \frac{1}{2}\varphi_0 \cos 2\varphi_0 \tag{12}$$

따라서 단일범프포일의 강성 및 감쇠계수는 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$K_b = \frac{1}{\alpha_u} \tag{13}$$

$$C_b = \frac{2\mu\alpha_v}{\pi\omega\alpha_u^2} \tag{14}$$

2-3. 이중범프의 변형모델

2-3-1. 단일범프작동영역(Single Active Region)

Fig. 4(a)는 단일범프작동영역에 있는 이중 범프가 압력을 받고 있을 때 자유물체도를 그린 것이다. 이 영역에서의 범프의 변형은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$U^u = \alpha_{u1}^u P \tag{15}$$

$$V^u = \alpha_{v1}^u P \tag{16}$$

$$U^l = (\alpha_{u2}^l - \alpha_{u1}^l) P \tag{17}$$

$$V^l = (\alpha_{v2}^l - \alpha_{v1}^l) P \tag{18}$$

여기서

$$\alpha_{u1}^u = \frac{\rho_0^3 W_0 S_0 P_a (I_1^u - \mu I_2^u)}{2E^u I^u c} \tag{19}$$

$$\alpha_{u1}^1 = \frac{\rho_0^3 w_0 s_0 p_a (I_1' - \mu_1 I_2')}{2E^I I^c} \quad (20)$$

$$\alpha_{u2}^1 = \frac{\rho_0^3 w_0 s_0 p_a (I_1' - \mu_2 I_2')}{2E^I I^c} \quad (21)$$

$$\alpha_{v1}^u = \frac{\rho_0^3 w_0 s_0 p_a (I_2'' - \mu_1 I_3'')}{2E^I I^c} \quad (22)$$

$$\alpha_{v1}^1 = \frac{\rho_0^3 w_0 s_0 p_a (I_2' - \mu_1 I_3')}{2E^I I^c} \quad (23)$$

$$\alpha_{v2}^1 = \frac{\rho_0^3 w_0 s_0 p_a (I_2' - \mu_2 I_3')}{2E^I I^c} \quad (24)$$

따라서 이중범프가 단일범프작동영역에서 거동할 때 강성 및 감쇠계수는 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$K_b = \frac{1}{\alpha_{u1}^1} \quad (25)$$

$$C_b = \frac{2}{\pi \omega \alpha_{u1}^2} (\mu_1 \alpha_{v1}^u + (\mu_2 - 2\mu_1) (\alpha_{v2}^1 - \alpha_{v1}^1)) \quad (26)$$

2-3-2. 이중범프작동영역(Double Active Region)

Fig. 4(b)는 이중범프작동영역에 있는 이중 범프가 압력을 받고 있을 때 자유물체도를 그린 것이다. 두 범프 사이의 높이차(height difference)는 다음과 같다.

$$\Delta H = U'' - U' \quad (27)$$

식 (27)을 이용하면 범프의 정상에서 발생하는 접촉력(contact force)은 다음과 같이 계산되어진다.

$$G = \frac{(\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1 - \alpha_{u2}^1)P - \Delta H}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} \quad (28)$$

따라서 이 영역에서의 범프의 변형은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$U'' = \frac{\alpha_{u1}^u \alpha_{u2}^1}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} P + \frac{\alpha_{u1}^u \Delta H}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} \quad (29)$$

$$V'' = \frac{\alpha_{v1}^u \alpha_{u2}^1}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} P + \frac{\alpha_{v1}^u \Delta H}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} \quad (30)$$

$$U' = \frac{\alpha_{u1}^u \alpha_{u2}^1}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} P - \frac{\alpha_{u1}^u \Delta H}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} \quad (31)$$

$$V' = \frac{\alpha_{u1}^u \alpha_{v2}^1 + \alpha_{\Delta uv}^1}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} P - \frac{\alpha_{v1}^u \Delta H}{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1} \quad (32)$$

여기서

$$\alpha_{\Delta uv}^1 = \left(\frac{\rho_0^3 w_0 s_0 p_a}{2E^I I^c} \right)^2 (\mu_1 - \mu_2) (I_1' I_3' - I_2'^2) \quad (33)$$

그리고 이중범프가 이중범프작동영역에서 거동할 때 강성 및 감쇠계수는 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$K_b = \frac{\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1}{\alpha_{u1}^u \alpha_{u2}^1} \quad (34)$$

$$C_b = \frac{2}{\pi \omega \alpha_{u1}^2 \alpha_{u2}^2} \{ \mu_1 (\alpha_{\Delta uv}^1 + \alpha_{u1}^1) (\alpha_{v1}^u \alpha_{u2}^1 - 2\alpha_{u1}^u \alpha_{v2}^1 - 2\alpha_{\Delta uv}^1) + \mu_2 (\alpha_{u1}^u + \alpha_{u1}^1) (\alpha_{u1}^u \alpha_{v2}^1 + \alpha_{\Delta uv}^1) \} \quad (35)$$

3. 성능 해석

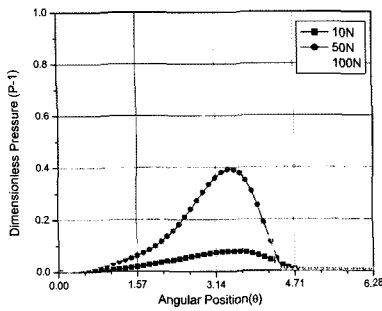
3-1. 해석모델

단일범프 AFB와 이중범프 AFB에 대해 성능해석을 수행하였다. 두 베어링의 직경이 50 mm, 길이가 50 mm, 간극(clearance)이 0.05 mm인 경우로 가정하였으며, 공기의 점성을 $1.789 \times 10^{-5} Pa \cdot s$, 공기의 밀도를 $1.225 kg/m^3$ 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.

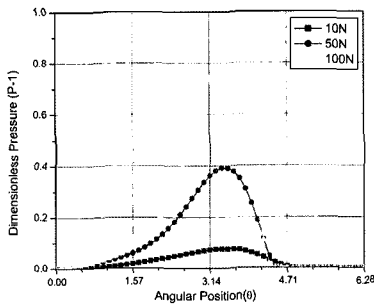
단일범프포일인 경우, 범프의 반호길이(half length)를 1 mm, 높이를 0.5 mm, 두께를 0.05 mm, 피치를 3 mm로 가정하였다. 범프포일과 슬리브사이의 마찰계수를 0.1로 두었다. 이중범프포일 중에서 상위범프의 경우 단일범프의 경우와 동일한 치수를 가지는 것으로 가정하였다. 이중범프포일 중에서 하위범프의 경우, 범프의 반호길이(half length)를 0.98 mm, 높이를 0.49 mm, 두께를 0.05 mm, 피치를 3 mm로 가정하였다. 따라서 두 범프의 높이차를 0.01 mm로 가정하였다. 이중 범프의 상위범프와 하위범프 사이의 마찰계수를 0.1로 가정하였으며, 하위범프와 슬리브 사이의 마찰계수를 0.1로 두었다. 회전속도를 20,000 rpm으로 고정시키고, 하중을 0~10 N까지 변화시키면서 정적 및 동적 성능을 검토하였다.

3-2. 정적성능 해석결과

Fig. 5는 단일범프 AFB와 이중범프 AFB에 대하여, 회전속도가 20,000 rpm일 때 하중을 변화시키면서 축방향 중심선을 따르는 압력분포를 그린 것이다. 50 N 이하의 가벼운 하중일 때 두 베어링에서의 압력분포는 완전히 일치한다. 그러나 60 N 이상의 무거운 하중일 때 이중범프 AFB의 최대 압력은 단일범프 AFB의 최대압력보다도 더 크며, 이로 인해 더 큰 부하지지능력을 가지게 될 것으로 기대된다. Fig. 6은 단일범프와

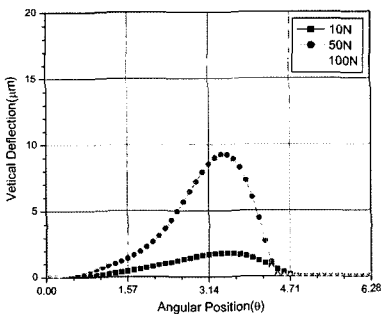


(a) Single-bumped AFB

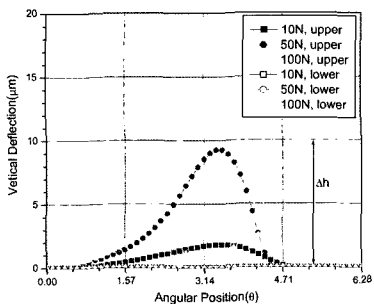


(b) Double-bumped AFB

Fig. 5. Pressure distribution according to the center line of the AFBs.



(a) Single-bumped AFB

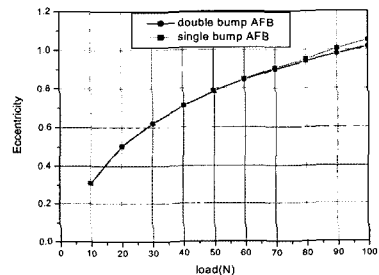


(b) Double-bumped AFB

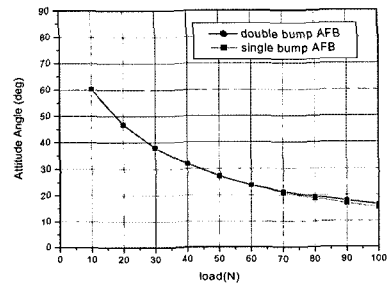
Fig. 6. Vertical deflection according to the center line of the AFBs.

이중범프 AFB에 대하여, 회전속도가 20,000 rpm일 때 하중을 변화시키면서 축방향 중심선을 따르는 수직방향 변형량을 그린 것이다. 50 N이하의 가벼운 하중일 때 두 베어링에서의 변형량은 완전히 일치한다. 그러나 60 N이상의 무거운 하중일 때 이중범프 AFB의 최대 변형량은 단일범프 AFB의 최대 변형량보다도 더 작으며, 이중범프 중 하위범프가 상위범프와 접촉한 상태로 함께 변형하고 두 변형량의 차이가 원래의 범프의 높이차(height difference)와 같음을 확인할 수 있다. 이 경우에 있어서 이중범프 작동영역은 60 N이상의 하중조건에서 발생함을 알 수 있다.

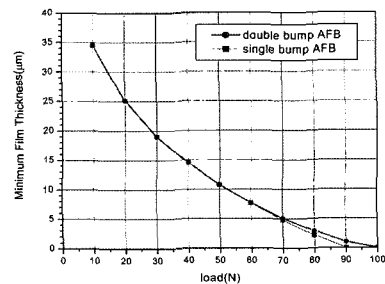
Fig. 7은 하중변화에 대한 두 AFB의 정적 성능을 나타낸다. 두 AFB의 편심률(eccentricity), 자세각(attitude angle), 로터궤적(rotor locus) 및 최소유막두



(a) Eccentricity

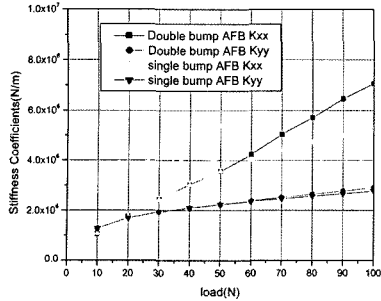


(b) Attitude angle

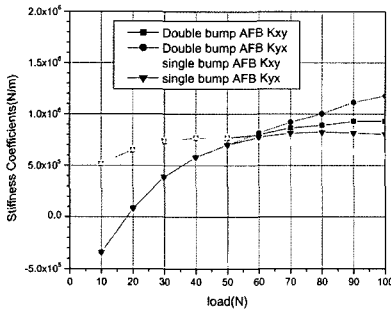


(c) Minimum film thickness

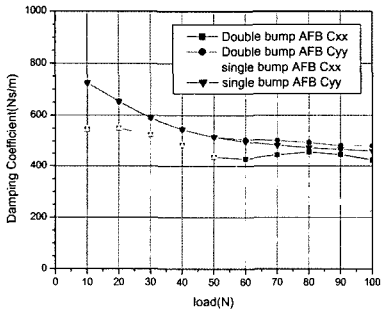
Fig. 7. Static performances of the AFBs.



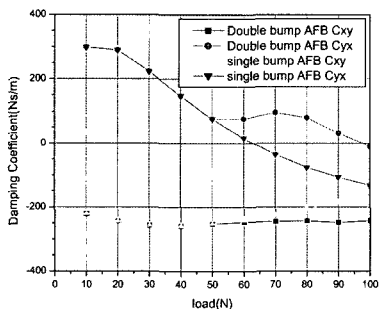
(a) K_{xx} and K_{yy}



(b) K_{xy} and K_{yx}



(c) C_{xx} and C_{yy}



(d) C_{xy} and C_{yx}

Fig. 8. Stiffness and damping coefficients of the AFBs.

계(minimum film thickness)는 단일범프작동영역에서는 동일한 값을 가지나 이중범프작동영역에서는 서로

다른 값을 가짐을 볼 수 있다. 이중범프작동영역에서 이중범프 AFB의 편심률은 단일범프 AFB의 편심률보다 더 작고, 이중범프 AFB의 자세각은 단일범프 AFB의 자세각보다 더 크다. 또 이중범프작동영역에서 이중범프 AFB의 최소유막두께는 단일범프 AFB의 최소유막두께보다 더 크다. 따라서 이중범프작동영역에서 이중범프 AFB의 부하지지능력은 단일범프 AFB의 경우보다도 더 크다고 할 수 있다.

3-3. 동적성능 해석결과

Fig. 8은 단일범프 AFB과 이중범프 AFB에 대하여, 회전속도가 20,000 rpm일 때 하중을 변화시키면서 강성계수와 감쇠계수를 계산한 그림이다. 직강성계수(K_{xx}, K_{yy})는 하중이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 대체로 하중방향의 직강성계수(K_{xx})가 하중에 수직방향의 직강성계수(K_{yy})보다 큰 값을 가짐을 볼 수 있다.

또한 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.

가벼운 하중일 때는 단일범프작동영역에서 움직이게 되고, 이중범프 AFB의 강성 및 감쇠계수는 단일범프 AFB의 경우와 동일한 값을 가진다. 그러나 하중이 60 N이상으로 커지게 되면 이중범프의 강성계수($K_{xx}, K_{yy}, K_{xy}, K_{yx}$)는 단일범프의 강성계수보다도 커지게 됨을 볼 수 있다. 특히 하중이 아주 커지게 됨에 따라 이중범프 AFB의 하중방향 직강성계수(K_{xx})와 직감쇠계수(C_{xx})는 단일범프 AFB의 경우보다 훨씬 더 커짐을 볼 수 있다. 따라서 축하중이 큰 경우나 외란이 심하게 작용하는 경우에도 이중범프 AFB는 단일범프 AFB에 비해 큰 강성과 감쇠를 제공함으로써 시스템의 안정성을 향상시키는 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 단일범프 AFB의 성능해석을 위한 이론적 모델[8]을 확장하여, 이중범프 AFB의 성능해석을 위한 이론적 모델을 제시하였다. 이중범프포일의 수직 및 수평방향 변형식이 유도되었으며, 이를 이용하여 범프의 등가 동적계수들을 도출하였다.

제시된 이론을 바탕으로 이중범프 AFB의 정적 및 동적성능해석이 수행되었으며, 단일범프의 경우와 비

교하였다. 결과적으로 이중범프 AFB의 경우 고하중이 작용하는 경우(heavily loaded condition)에는 이중범프 작동영역에서 거동하면서 부하지지능력을 향상시켜줄 뿐만 아니라, 베어링의 강성 및 감쇠를 향상시켜줌으로써, 결과적으로 시스템의 안정성이 향상되는 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Walowit, J. A. ,Anno, 1975, "Modern Development of Lubrication Mechanics," Applied Science Publishers, Ltd., London, 1975.
2. H. Heshmat, J. A. Walowit and O. Pinkus, "Analysis of Gas-Lubricated Foil Journal Bearings," ASME J. Lubrication Technology, pp. 647-655, 1983.
3. J.-P. Peng. and M. Carpino, "Calculation of Stiffness and Damping Coefficients for Elastically Supported Gas Foil Bearings," ASME J. Trib., Vol. 115, pp. 20-27, 1993.
4. J.-P. Peng. and M.Carpino, "Coulomb Friction Damping Effects in Elastically Supported Gas Foil Bearings," Trib. Trans., Vol. 37, pp. 91-98, 1994.
5. H. Heshmat, "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearing : High Speed and Load Capability," ASME J. Trib., pp. 287-295, 1994.
6. 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.
7. Hooshang Heshmat, "Operation of Foil Bearings Beyond the Bending Critical Mode," Journal of Tribology, pp. 192-198, 2000.
8. 김영철, 이동현, 김경웅, "공기포일베어링의 성능에 미치는 범프마찰효과," 한국윤활학회지, 제 21권 6호 pp. 283-288, 2005.