

진공예압형 다공질 공기베어링의 압력분포 및 성능해석

Analysis on the Static Performance of Vacuum-Preloaded Porous Air Bearings

김경호^{1,✉}, 박천홍¹
Gyungho Khim^{1,✉} and Chun Hong Park¹

¹ 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 (Department of Ultra Precision Machines and Systems)
✉ Corresponding author: gyungho@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7105

Manuscript received: 2013.8.28 / Accepted: 2013.11.19

Air bearings are widely used in precision stages because of low friction and high motion accuracy, however, they suffer from low stiffness in comparison with rolling bearings or hydrostatic bearings. So, several preloading methods using weight, magnet and vacuum force, and opposing pads have been used to increase the stiffness of the air bearings. In this paper, pressure distributions of the vacuum preloaded porous air bearings are calculated using the proposed method. And then, the load capacity and stiffness are analyzed. For the vacuum preloaded air bearings, the stiffness is increased owing to reduced bearing clearance by vacuum force. The simulation results indicate that variation of vacuum pressure with clearance in the vacuum pocket gives rise to low stiffness, so the vacuum pocket should be designed for pressure to be constantly maintained regardless of the bearing clearance by means of large effective pumping speed.

Key Words: Porous air bearing (다공질 공기베어링), Vacuum preload (진공예압), Load capacity (부하용량), Stiffness (강성), Pressure distribution (압력분포)

1. 서론

초정밀 스테이지에 요구되는 운동정밀도가 높아짐에 따라 안내면의 베어링으로는 공기베어링이 널리 사용되고 있다. 공기베어링은 압축공기에 의해 부상하는 방식으로 공기의 점성이 낮아 마찰과 열 발생이 거의 없고 평균화 효과에 의해 레일형상오차 이상의 정밀도를 달성할 수 있기 때문이다.¹ 그러나 공기막에 의해 부하를 지지하기 때문에 구름베어링이나 유정압 베어링에 비해 강성이 상대적으로 떨어지는 단점이 존재한다. 따라서 공기베어링에서는 일반적으로 예압을 가하여 강성을 향상시키고 있다.

예압을 가하는 방법으로는 자중, 자력, 진공압, 그리고 양면패드 방식이 있다.² 자중예압 방식은

이송테이블에 추가 질량을 설치하여 보다 작은 간극에서 작동하게 하므로 이미 무거운 공작물이 올려져 있는 시스템에 적합하다. 자기예압 방식은 가이드 레일의 자성체와 테이블의 자석 사이에서 발생하는 자력에 의해 예압을 가하는 방법으로, 레일에 자성체를 덧붙여야 하며, 고속으로 구동시 와전류에 의한 저항이 발생하는 단점이 있다. 진공예압 방식은 진공압을 이용하여 예압을 가하는 방법으로 저중심 설계가 필요한 평면 스테이지에 적합하다. 그러나 낮은 진공압에 의한 흡인력의 한계 및 진공을 위한 추가 장비가 필요하다는 단점이 있다. 마지막으로 양면패드에 의한 예압방식은 공기베어링 패드를 레일에 대해 대칭으로 설치하여 예압을 주는 방법으로 가장 신뢰성 있게 작동한다. 반면에 차지하는 공간이나 레일의 가공공

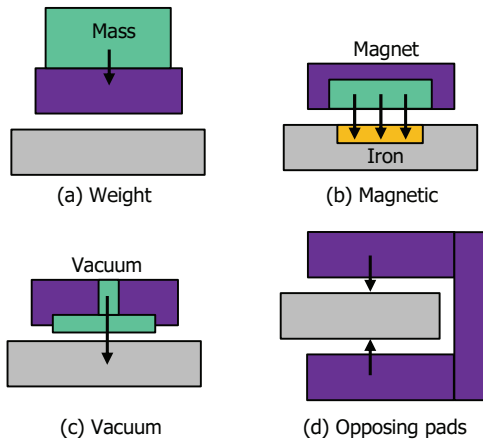


Fig. 1 Preloading methods in air bearings

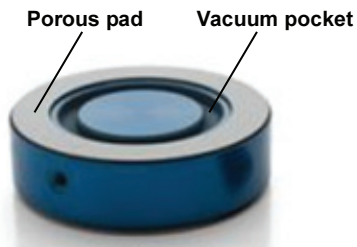


Fig. 2 Vacuum preloaded air bearings: New Way Air Bearings®

차면에서 어려움이 존재한다.

본 연구에서는 이 중에서 진공예압방식을 선정하여, 압력분포 해석을 통해 부하용량 및 강성 특성을 분석하고자 한다. 진공예압은 공기베어링의 어떤 타입에 대해서도 적용 가능하나 본 논문에서는 하나의 예로 다공질 재료(porous media)를 사용한 공기베어링을 대상으로 하였다. 진공예압형 공기베어링은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 기존의 다공질 공기베어링 주위에 진공을 위한 포켓을 설치하여 진공압으로 예압을 가하게 된다. 따라서 진공예압형 공기 베어링의 특성을 알아보기 위해서는 부상을 위한 다공질 패드와 흡입력을 위한 진공포켓을 동시에 고려하여 해석해야만 한다. 다공질 패드의 압력분포에 대해서는 이미 많은 연구^{3,4}가 진행되어 왔으므로, 본 논문에서는 진공 포켓에서의 압력분포 해석 방법을 제안하고, 이를 다공질 공기패드와 결합하여 여러가지 설계변수들에 따른 진공예압형 공기 베어링의 성능특성에 대해 살펴보았다.

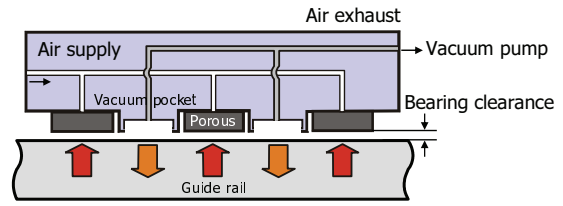


Fig. 3 Structure of vacuum preloaded air bearing

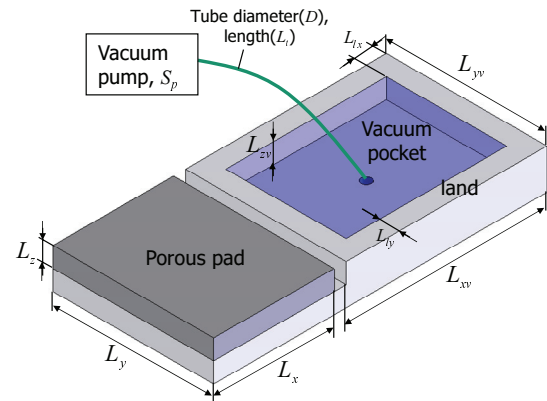


Fig. 4 Vacuum preloaded air bearing for pressure analysis

2. 진공예압형 공기베어링의 압력분포 해석

2.1 진공예압형 공기베어링의 구조

진공예압형 다공질 공기 베어링의 구조는 Fig. 2와 같이 모듈 타입으로 상품화된 제품⁵이 있으며, 이 경우 하나의 베어링 내에 부상부와 흡입부가 존재하고, 이를 필요한 용량만큼 여러 개 사용하여 설계한다. 반면에 Fig. 3과 같이 사용자 설계 타입인 경우, 목적에 맞게 부상부와 흡입부의 구조 및 형태를 임의대로 설계할 수 있다.

본 논문에서는 사용자 설계 타입을 대상으로 하였으며, 해석에 사용된 다공질패드와 진공포켓의 구조를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 압축공기가 다공질 재료를 거쳐 10 μm 정도의 작은 간극을 통해 발생한 압력에 의해 테이블이 부상하게 되고, 이들 사이에 위치한 진공포켓 내부에서 진공압을 발생시켜 예압을 가하게 된다. 진공포켓과 외부 대기 사이의 좁은 간극(land)을 통하여 공기가 포켓 안으로 들어가지만 포켓 내의 공기는 진공펌프와 연결된 배관을 통해 외부로 배출되어 진공압을 유지하게 된다. Table 1은 해석모델에 대한 기본 치수를 나타낸다. 다공질 패드와 진공포켓의 간극 및 면적은 동일하게 설정하였다.

Table 1 Dimensions for pressure analysis

Porous pad	Dimension ($L_x \times L_y \times L_z$)	30×40×5 mm
	Permeability coefficient (k_x, k_y, k_z)	$3 \times 10^{-9} \text{ mm}^2$
	Supply pressure	$5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
Vacuum pocket	Pocket dimension ($(L_{xy}-2L_l) \times (L_{yz}-2L_l) \times L_{zv}$)	40×30×5 mm
	Land width, L_l	5 mm
	Pumping speed of vacuum pump, S_p	100 l/min
	Diameter of exhaust tube, D	20 mm
	Length of exhaust tube, L_t	1000 mm
Porous, Vacuum pocket	Clearance, h	10 μm
	Boundary pressure, P_a	$5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

2.2 다공질 패드 압력분포

다공질 패드에 대한 압력분포는 다공질 재료 내부, 간극 사이에 대한 기체의 지배 방정식으로부터 구한다.^{3,4} 다공질 재료 내부의 기체의 흐름에 대한 지배 방정식은 Darcy의 방정식으로부터 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_x \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

간극에서의 지배 방정식은 Reynolds 방정식으로부터 식(2)로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + h^3 \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} - 12k_z \frac{\partial p^2}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

여기서 k_x, k_y, k_z 는 다공질 재료의 x, y, z 방향에 대한 투과율 계수(permeability coefficient)를, h 는 베어링의 간극, p 는 다공질 패드 내부 및 간극에서의 압력을 의미한다.

식(1),(2)를 FDM(Finite Difference Method)과 SOR(Successive Over Relaxation) 수치해석법을 이용하여 베어링 간극에서 발생하는 압력분포를 계산한다.

2.3 진공 포켓 압력분포

진공포켓 압력분포 해석시 고려해야 할 주요 사항은 설계변수들에 따라 달라지는 진공압의 크기를 분석하는 것이다. 진공압에 따라 베어링의 평형 간극이 달라지고 이로부터 부하용량과 강성이 결정되기 때문이다. 고려해야 할 주요 설계 변

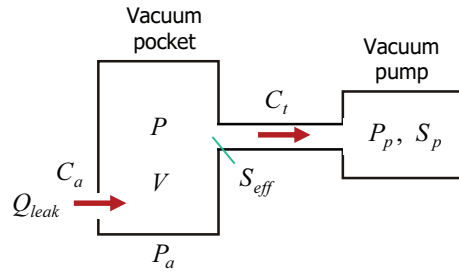


Fig. 5 Schematic diagram of vacuum pocket for pressure analysis

수로는 베어링 간극, 진공포켓과 진공펌프를 연결하는 배관의 직경과 길이, 진공펌프의 배기속도가 있다.

Fig. 5는 진공포켓에서의 압력을 계산하기 위한 모델을 보여주는 것으로, 진공포켓을 작은 챔버로 간주하고 이 챔버 외벽에서 베어링의 간극에 해당하는 구멍을 통해 누출(leak)이 존재하는 시스템으로 설정하였다. 여기서 기체누출이 발생하는 간극의 단면은 직사각형으로 생각할 수 있으며, 사각 단면의 세로높이는 베어링의 간극, 사각단면의 가로길이는 진공포켓의 둘레라 할 수 있다. 이때, 베어링 간극을 통해 진공포켓으로 들어오는 유량과 배관을 통해 진공펌프로 배출되는 유량이 같으므로, 식(3)와 같이 유량의 평형방정식을 이끌어 낼 수 있다.

진공예압을 위한 펌프는 고진공이 필요 없으므로 로타리 펌프만으로도 충분하며, 펌프의 배기속도는 사용영역 내에서 일정하다고 가정하였다. 또한 배관의 컨덕턴스를 구할 때, 공기의 점성유동(viscous flow)과 분자유동(molecular flow) 상태를 고려해야 하지만⁶⁻⁸, 진공예압을 위해서는 고진공 영역이 필요 없으므로 점성유동 상태만을 가정하였다.

$$Q = S_{eff} \cdot P = -V \frac{dP}{dt} + Q_{leak} \quad (3)$$

$$= S_p \cdot P_p = C_t (P - P_p)$$

where, $Q_{leak} = C_a (P_a - P)$, $S_{eff} = \frac{C_t}{1 + C_t / S_p}$

$$C_t = 1349 \frac{D^4}{L_t} \cdot \frac{P + P_p}{2}, \quad C_a = 4581 \frac{ab^3}{L_t} \cdot \frac{P_a + P}{2} \cdot \psi$$

$$\psi = 1 - \frac{192b}{\pi^5 a} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\tanh(2m+1)\pi a / 2b}{(2m+1)^5}$$

여기서 Q 는 펌프를 통해 배출되는 유량, Q_{leak} 는 베어링 간극을 통해 유입되는 유량, S_{eff} 는 진공 펌프의 유효배기속도, P 는 포켓 압력, V 는 포켓 부피, S_p 는 진공펌프의 배기속도, P_p 는 펌프 입구부의 압력, P_a 는 대기압, 그리고 C_l 는 배관의 컨덕턴스, C_a 는 간극의 컨덕턴스를 의미한다. 또한 D 는 단면이 원형인 배관의 직경, L 는 배관의 길이, L_r 은 랜드의 폭, a 는 사각단면을 가진 배관의 긴변의 길이로 여기서는 진공포켓의 둘레길이를, b 는 짧은 변의 길이로 베어링 간극이라 할 수 있다. ψ 는 실험 결과를 바탕으로 이론적 수식을 보정하는 보정계수로써 사각단면의 긴변과 짧은변의 길이의 함수로써 나타내진다.⁶⁻⁸

식(3)을 시간에 따른 압력의 변화식으로 정리하면 식(4)와 같다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{S_p}{AV} (S_p - \sqrt{S_p^2 + A^2 P^2}) + \frac{B}{2V} (P_a^2 - P^2) \quad (4)$$

식(4)를 Runge-Kutta법을 이용하여 해석하고 진공포켓 내의 압력을 시간에 따라 나타내면 Fig. 6과 같다. 진공포켓 내의 압력에 영향을 미치는 인자로는 펌프의 배기속도, 배관의 직경 및 길이가 있는데, 여기서는 이들을 대신하여 유효배기속도를 도입하였다. 유효배기속도는 배관의 컨덕턴스 및 펌프의 배기속도를 고려하여 진공포켓에 배관 없이 직접 펌프가 연결되어 있다고 가정한 배기속도이다. 유효배기속도가 0.1 l/min로 작을 때에는 배출되는 공기보다 베어링 간극을 통해서 들어오는 공기가 많기 때문에 0.9×10^5 Pa 정도의 압력에서 평형을 이루고 있다. 반면에 유효배기속도가 10 l/min가 되면 매우 빠른 속도로 공기배출이 이루어지기 때문에 더 낮은 압력인 0.1×10^5 Pa 미만에서 평형압력에 도달하게 된다. 한편, 진공포켓에서의 최종압력은 식(4)에서 $dP/dt = 0$ 으로 놓으면 구할 수 있다.

진공포켓을 둘러싸고 있는 랜드부의 압력분포는 다공질 패드에서와 마찬가지로 Reynolds 방정식을 적용하여 해석하였다. 최종 계산된 진공예압형 공기베어링의 압력분포는 Fig. 7과 같다.

3. 진공예압형 공기베어링의 성능 해석

3.1 부하용량 및 강성

진공예압형 공기베어링에서 다공질 패드와 진

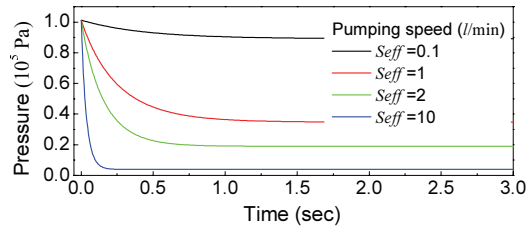


Fig. 6 Pressure in vacuum pocket with effective pumping speed and time

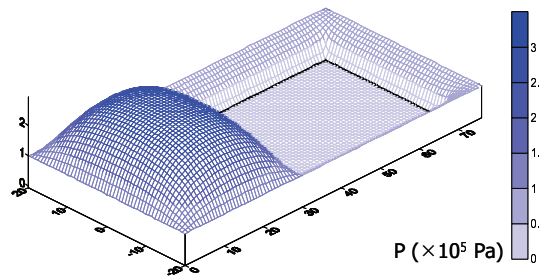


Fig. 7 Pressure distributions in porous pad and vacuum pocket

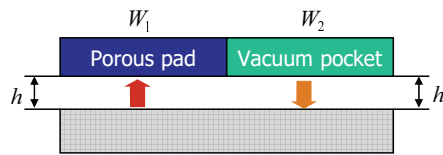


Fig. 8 Load diagram of vacuum preloaded air bearing

공포켓 하나만을 따로 표시하면 Fig. 8과 같으며, 이 때 부하용량과 강성을 다공질 패드와 진공포켓에서 발생하는 힘을 이용하여 나타내면 식(5)와 같다. 부하용량은 다공질패드와 진공포켓에서 발생하는 힘의 합으로 계산되며, 여기서 진공포켓에 작용하는 힘은 대기압보다 작기 때문에 음(-)의 부호를 갖는다. 강성 또한 다공질패드와 진공포켓에서의 강성의 합으로 계산된다. 진공포켓에서는 하중을 지지할 수 없으므로 강성이 정의될 수 없으나 이해하기 쉽게 수식적으로 나타내면 음(-)의 값을 갖는다고 할 수 있다. 따라서 베어링의 평형간극이 변하지 않는다고 가정할 때 부하용량과 강성 모두 감소하게 된다. 외부하중이 가해지면, 다공질패드에서는 간극이 좁아지면서 하중을 지지하려 하지만 진공포켓에서는 간극이 좁아지면서 오히려 더 큰 흡인력으로 잡아당기게 되어 강성은 줄어들게 되는 것이다. 그러나 실제 진공예압형 공기베

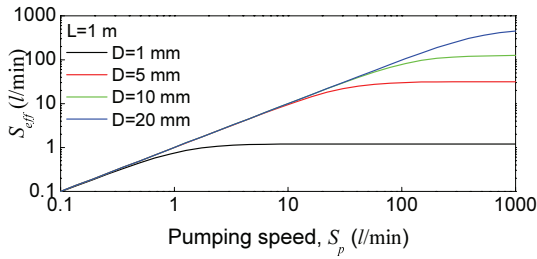


Fig. 9 Effective pumping speed with tube diameter

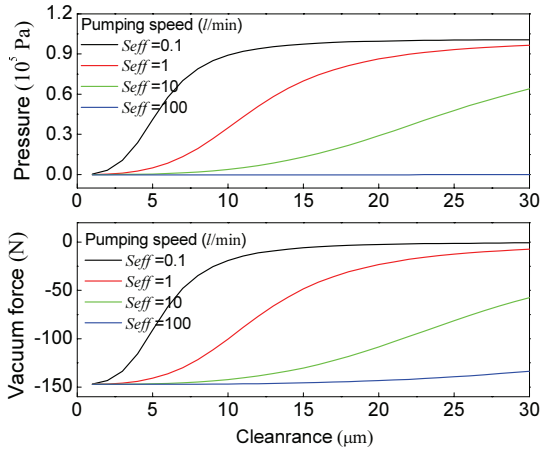


Fig. 10 Pressure and vacuum force in vacuum pocket with effective pumping speed and bearing clearance

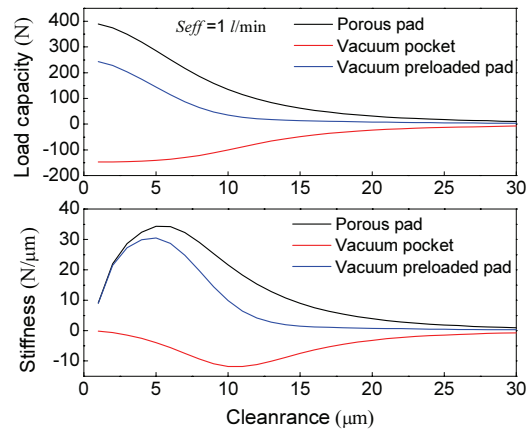
어링에서는 진공압에 의해 평형간극이 줄어들기 때문에 강성의 증가효과를 볼 수 있다. 즉, 자중예압과 마찬가지로 진공압에 의해 평형간극이 줄어들면서 강성의 증가 효과를 얻을 수 있는 것이다.

$$W = W_1 + W_2$$

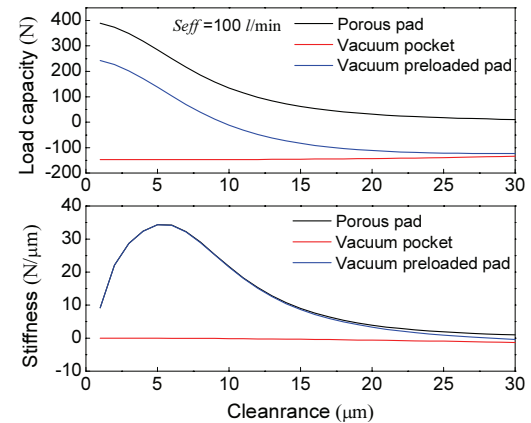
$$K = -\frac{dW}{dh} = -\frac{dW_1}{dh} - \frac{dW_2}{dh} = K_1 + K_2 \quad (5)$$

진공예압형 다공질 공기베어링의 평형간극은 진공압에 의해 바뀌므로, 부하용량과 강성 해석시 다공질패드와 진공포켓의 조건을 모두 고려해야 한다. 즉, 진공포켓 내의 압력은 베어링의 간극, 배관의 직경, 길이 및 펌프의 배기속도와 같은 설계변수들의 영향을 받으며, 이렇게 형성된 진공압에 의해 베어링의 평형간극이 바뀌면 다공질 패드에 의한 부상력도 달라지게 된다.

진공포켓의 압력은 이와 같이 여러변수들의 영



(a) Small effective pumping speed ($S_{eff} = 1$ l/min)



(b) Large effective pumping speed ($S_{eff} = 100$ l/min)

Fig. 11 Load capacity and stiffness with effective pumping speed

향을 받지만, 여기서는 이들 개별 변수 대신 앞서 정의한 유효배기속도를 도입하여 해석을 수행하였다. Fig. 9는 펌프의 배기속도, 배관의 직경에 따른 유효배기속도를 나타낸 것으로, 배관의 직경이 작을 경우 실제 사용한 펌프의 배기속도보다 훨씬 작은 크기의 유효배기속도로 작동하고 있으며, 20 mm 이상의 큰 직경의 배관을 사용하면 사용한 펌프의 배기속도 그대로 작동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 유효배기속도에 따라 해석된 진공포켓의 압력 및 이때 발생한 흡인력을 나타낸다. 유효배기속도가 클수록, 또 베어링 간극이 작을수록 진공패드의 압력은 작아지며, 따라서 보다 큰 흡인력이 작용하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11(a), (b)는 각각 유효배기속도가 1, 100 l/min일때 부하용량과 강성을 계산한 것이다. 유효 배기속도가 작을 때에는 간극에 따라 진공압의 변화가 발생하므로 부하용량과 강성 모두 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, 유효배기속도가 클 때에는 간극의 변화에 관계없이 진공포켓 내에 거의 일정한 압력이 형성되므로, 동일한 간극이라 하더라도 강성의 저하는 발생하지 않는다. 그러나 실제 시스템의 경우 진공압에 의해 베어링의 평형 간극이 줄어들므로 이에 의해 강성은 증가하게 된다. 단, 진공압에 의한 흡인력이 다공질 패드의 부상력보다 크게 되면 부상이 이루어지지 않으므로 이때의 강성은 의미가 없다.

따라서 진공예압에 의한 강성증가 효과를 위해서는 Fig. 11(b)와 같이 유효배기속도를 크게 하여 간극에 관계없이 일정한 진공압이 형성되도록 설계해야 한다.

3.2 진공예압형 공기베어링의 설계 예

베어링 간극에 관계없이 일정한 진공압이 나오도록 설계하면 진공포켓에 의한 강성 저하는 발생하지 않는다. 따라서 진공예압형 공기베어링의 설계시에도 기존방법과 큰 차이가 없으며, 최대 강성을 위한 간극을 유지하도록 진공압에 의한 흡인력을 추가로 가해주면 된다.

Fig. 12는 진공예압형 공기베어링의 원리 및 설계 예를 보여준다. 초기에 100 N의 자중으로 지지된 베어링이 평형간극 16 μm를 유지할 때, 최대의 강성을 위해서는 간극을 8 μm로 조절해야 하며, 따라서 160 N의 하중을 추가로 가해주어야 한다. 이를 추가질량이나 자력, 진공압에 의해 할 수 있다. 따라서 진공압에 의해 가해주어야 하는 흡인력은 160 N으로, 이 힘에 해당하는 진공포켓의 압력과 면적을 결정한다. 단, 공급압력에 비해 진공압은 최대 $-1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 이므로 진공압을 무한정 낮추는 것은 불가능하다. 진공압을 결정한 후 흡인력을 맞추기 위해 진공포켓의 면적을 늘리거나, 공간상의 제약에 의해 면적 증가가 불가능하면 다공질패드에 들어가는 공급압력을 낮추어 재설계한다.

3.3 양면패드 예압 방식과의 비교

진공예압 방식은 자중예압형이나 자기예압형과 흡인력의 방법만 다를 뿐 같은 원리를 이용하는 것이다. 자중예압형과 자기예압 방식이 간극에 관계없이 흡인력이 일정한데 반해, 진공예압형은 간

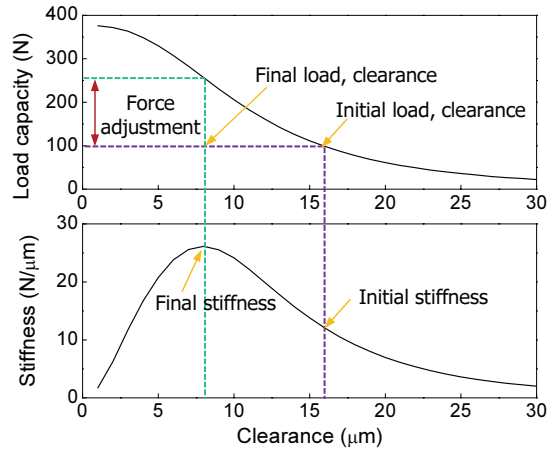


Fig. 12 Design example of vacuum preloaded air bearing

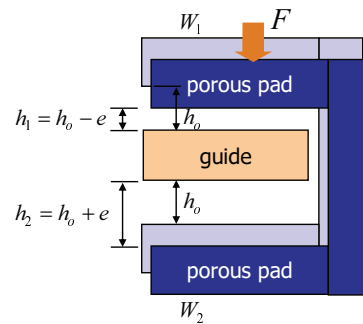


Fig. 13 Load diagram of opposing pads air bearing

극에 따라 흡인력이 달라 질 수 있으며, 이 경우 강성이 저하되므로 간극에 관계없이 일정한 흡인력이 나오도록 설계하는 것이 중요하다.

양면패드 예압방식의 경우, Fig. 13에서 보는 바와 같이 하중(F)이 가해지면 윗면과 아랫면에서 편심(e)이 생기고 이에 따라 평형 간극(h₁, h₂)이 달라지게 된다. 이 경우, 윗면과 아랫면의 변화된 간극에서 발생하는 압력에 의해 부하용량과 강성이 결정된다. 부하용량은 윗면과 아랫면에 작용하는 힘의 차이로, 강성은 각각 계산된 강성의 합으로써 식(6)에 의해 구해진다.^{3,4} 여기서 h₀는 설계간극이다.

$$W = W_1 - W_2$$

$$K = -\frac{dW}{dh_1} = -\frac{dW_1}{dh_1} - \frac{dW_2}{dh_2} = K_1 + K_2 \tag{6}$$

양면패드 베어링에서 하중이 가해지면 윗면에

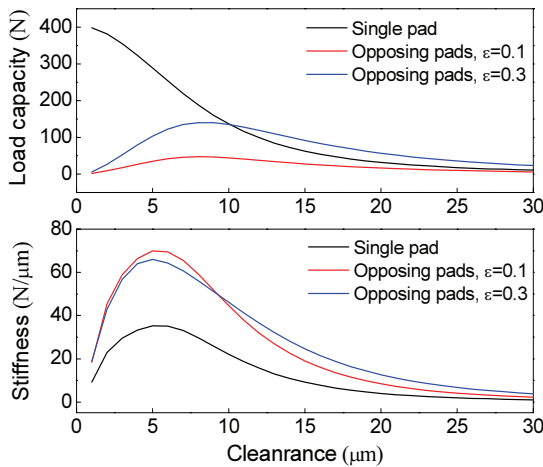


Fig. 14 Load capacity and stiffness of opposing pads air bearing

서는 간극이 좁아지면서 더 큰 하중을 지지하려고 하고, 아랫면에서는 간극이 커지면서 베어링을 아래로 밀어내는 힘이 약하게 되어 강성은 증가하게 된다. 반면에 진공예압형에서는 하중이 가해지면 다공질 패드에서는 간극이 좁아지면서 더 큰 하중을 지지하려고 하지만 진공포켓에서는 간극이 좁아지면서 오히려 더 큰 흡인력으로 잡아당기게 되어 강성은 줄어들게 되는 것이다.

Fig. 14는 양면패드 베어링에 대한 부하용량 및 강성을 편심율($e = e/h_0$)에 대해 나타낸 것으로, 단면 패드에 비해 부하능력은 떨어지지만 강성은 모두 증가하고 있다. 특히 양면패드 베어링을 최대 강성이 나오는 간극으로 설계하면 예압의 효과는 극대화된다. 이에 반해 진공예압형 베어링은 진공압에 의해 평형간극이 작아져 강성의 증가효과를 볼 수 있다는 점이 차이점이다. 즉, 베어링의 작동 신뢰성이나 강성 증가 목적으로는 양면패드 예압 방식이 적합하나, 공간이 많이 필요하고 양면레일의 사용으로 인해 가공공차 관리에 어려움이 있다. 이에 비해 진공예압형은 양면패드형에 비해 성능은 다소 떨어지지만 공간상의 장점으로 인해 저중심형의 평면 스테이지에 적합하다고 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 공기베어링의 강성을 향상시키기 위한 방법으로 진공예압을 적용한 경우, 그 해석방법 및 성능에 대해 분석하였다. 흡인력을 위

한 진공포켓의 압력분포를 펌프의 배기속도 등 여러 설계변수들에 의해 계산하였으며, 다공질패드와 결합된 진공예압 공기베어링의 부하용량, 강성 특성에 대해 분석하였다.

- 1) 진공예압형 공기베어링에서는 진공포켓에서 형성된 진공압에 의해 흡인력이 발생하므로 평형 간극이 작아짐에 의해 강성은 증가한다.
- 2) 간극에 대한 진공포켓의 압력 변화는 강성의 저하로 이어지므로, 진공압을 위한 배기 시스템은 유효배기속도를 높이는 방향으로 설계하여 진공포켓 내의 압력을 간극에 관계없이 일정하게 유지해야 한다.
- 3) 진공예압형 공기베어링은 양면패드 예압 방식에 비해 강성은 낮지만 기존의 단면패드에 진공포켓을 이용하여 예압을 가한 구조이기에 저중심형 평면 스테이지에 적합하다.

참고문헌

1. Slocum, A., "Precision Machine Design," Prentice-Hall International, Inc., pp. 580-589, 1992.
2. Nelson Air Corp., "Air Bearing Basics," http://www.nelsonair.com/NA_primer.htm (Accessed 18 Nov. 2013)
3. Wu, K. H. and Cusano, C., "Analysis of Externally Pressurized, Double-Pad, Gas Porous Thrust Bearing," ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 105, No. 1, pp.113-119, 1983.
4. Singh, K. C. and Rao, N. S., "Static Characteristics of Aerostatic Porous Rectangular Thrust Bearings," Wear, Vol. 77, No. 2, pp. 229-236, 1982.
5. New Way Air Bearings, "VPL Air Bearings," <http://www.newwayairbearings.com/products/vpl-air-bearings> (Accessed 18 Nov. 2013)
6. Fan, P., Chu, J., and Shao, J., "Conductance Calculation of Long Tubes with Rectangular Cross Section and Annular Cross Section in the Full Pressure Range," Vacuum, Vol. 68, No. 4, pp. 373-378, 2002.
7. Roth, A., "Vacuum Technology, Third updated and enlarged edition," North Holland Publishing, pp. 62-88, 1990.
8. Bae, S. H., In, S. R., Jung, K. H., Lee, Y. B., and Shin, Y. H., "Vacuum Engineering," The Korea Economic Daily Business Publication, pp. 61-101, 2000