

포켓의 깊이가 공기 베어링 스테이지의 햄머링 현상에 미치는 영향

이춘무¹ · 김규하² · 박상준³ · 황규진⁴ · 박상신^{5*}

¹㈜트리엔 대표이사

²(주)트리엔 연구소장

³영남대학교 대학원 기계공학과 석사졸업생

⁴영남대학교 대학원 기계공학과 석사과정생

⁵영남대학교 기계공학부 교수

Effect of the Pocket Depth on the Hammering Behavior of an Air Bearing Stage

Chun Moo Lee¹, Gyu Ha Kim², Sang Joon Park³, Gyu-Jin Hwang⁴ and Sang-Shin Park^{5*}

¹CEO, Corp. Tri-N

²Director of Research, Corp. Tri-N

³Master's Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University

⁴Msters Student, Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University

⁵Professor, School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

(Received May 4, 2021 ; Revised August 16, 2021 ; Accepted August 25, 2021)

Abstract—An air-bearing stage uses externally pressurized air as the lubricant between the stage and the rail. The supporting force generated by the supplied air makes the stage rise and move smoothly with extremely low friction. Mechanical contacts rarely happen, the bearing surfaces do not produce wear particles, and dust is not generated. It also has the advantage of having low energy loss and high precision. Because of its advantages, an air-bearing stage is used in several types of machines that require high precision. In this article, the effect of the pocket depth on the hammering phenomena of the air bearing is studied. An analysis program is developed to calculate the dynamic behavior of the stage by solving the Reynolds equation between the stage and the guide-way and the equations of motion on the stage. The acceleration, constant movement, and deceleration are applied to the stage. The stage is modeled as a five-degree-of-freedom system. In the course of the dynamic behavior, the hammering phenomena occur under some special conditions. The deeper the pocket, the more unstable the behavior of the stage, and air hammering occurs when it exceeds a certain depth. In addition, the higher the supply pressure, the more unstable the behavior of the stage. However, hammering occurs even with a shallow pocket depth. Other conditions that affect the hammering phenomena are calculated and discussed.



© Korean Tribology Society 2021. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords—air bearing stage(공기베어링 스테이지), clearance(틈새), hammering(햄머링), pocket depth(포켓 깊이)

*Corresponding author: Sang-Shin Park

Tel: +82-53-810-3538, Fax: +82-53-810-4627

E-mail:pss@ynu.ac.kr

<http://orcid.org/0000-0002-1201-558X>

Nomenclature

A : Area of supply hole (m²) (급기공 면적)

C : Clearance (μm) (베어링 기준 틈새)

- C_d : Discharge constant (방출계수)
 e : Eccentricity of stage (μm) (편심량)
 F : Bearing reaction force (N) (베어링 반력)
 h : Height (μm) (동적 공기막 높이)
 h_p : Height of Pocket (mm) (포켓의 깊이)
 I : Inertia of moment ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) (관성모멘트)
 M : Bearing reaction moment ($\text{N} \cdot \text{m}$) (모멘트)
 m : Mass of Stage (kg) (스테이지 질량)
 p : Bearing pressure (bar) (베어링압력)
 p_{ij} : Pressure right under the supply hole (bar)
 (급기공아래의 압력)
 p_s : Supply pressure (bar) (공급압력)
 q_{sij} : Supplied flow rate (kg/s) (공급질량유량)
 R : Gas constant ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$) (기체상수)
 T : Temperature (K) (온도)
 κ : Specific heat ratio of air (비열비)
 ϕ : Tilting angle of stage (rad) (틸팅각)
 μ : Viscosity ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) (점도)
 $\Delta x \Delta y$: Surface area of the element including supply hole (m^2) (급기공 포함한 요소의 단면적)

Subscript

- 1^{st} L : Left Surface (슬라이더의 좌측면)
 1^{st} R : Right Surface (슬라이더의 우측면)
 2^{nd} B : Bottom Surface (슬라이더의 아래면)
 2^{nd} M : Middle Surface (슬라이더의 중간면)
 2^{nd} T : Top Surface (슬라이더의 윗면)

1. 서 론

최근 높은 정밀도를 요구하는 반도체 공정의 이송 장비에는 공기 베어링 스테이지가 주로 사용되고 있다. 이러한, 공기 베어링 스테이지에는 외부에서 가압된 고압의 공기가 스테이지와 레일 사이에 공급된다. 공급된 고압의 공기로 인해 발생하는 힘에 의해 스테이지가 부상하게 되고 마찰이 없는 부드러운 운동으로 거동하게 된다. 따라서 기계적인 접촉이 없어, 베어링 표면은 마모가 발생하지 않으므로 분진이 발생하지 않는다. 또한 에너지 손실이 적으며 높은 정밀도를 갖는다는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 높은 정밀도를 요구하는 초정밀 공작기계나 측정기 등에 사용되어져 왔다.

안정적인 스테이지를 설계하기 위해서는 공기 베어링 스테이지의 하중 지지용량 및 정밀도를 예측하는 기술은 필수적이다. 이러한 공기 베어링 스테이지의 하중 지지 용량 및 정밀도는 공기 베어링 영역에 공급된 공기의 압력분포에 의해 결정되는데, 이 압력은 두 가지 메커니

즘에 의해 발생한다. 첫번째는 외부에서 가압된 공기가 급기공을 통과한 후, 베어링과 레일 사이에 채워지면서 발생하는 정압 효과 메커니즘이다. 두번째는 스테이지와 가이드 레일 사이의 상대 운동에 의해서 발생하는 동압 효과 메커니즘이다. 동압 효과는 두 면사이의 상대속도, 가속하거나 감속할 때의 관성력, 및 윤활 영역에서의 유체력 등 다양한 외력들에 의해 결정된다. 이러한 동압 효과는 정압 효과와 연성되며, 스테이지의 거동에 영향을 미치게 되어 이송 정밀도를 변화시키게 된다.

공기 베어링 스테이지에서 이송 능력이 중요한 성능이기 때문에 이송 정밀도에 대한 연구는 많이 이루어져 왔다. Tian 등은 공기 베어링이 적용된 스테이지의 이송 정밀도에 대해 연구한 바 있다[1]. 하지만, 공기베어링을 일련의 선형 및 회전 스프링으로 모델링 하는데 그쳤다. 또한 Li 등은 공기 베어링 스테이지에서 제어기의 위치와 그 조합이 이송 정밀도에 미치는 영향에 대해 연구한 바 있으며[2], Huang 은 자력 캘리브레이션 방법을 이용하여 초정밀 스테이지의 위치 정밀도 보상에 대한 연구를 진행한 바 있다[3]. 한편, Gao 등은 스테이지의 다자유도 운동 오차에 대한 측정 방법을 제시한 바 있으며[4], Ro 등은 초정밀 직선 운동을 위하여 능동 자기베어링을 이용한 예압을 주는 방법을 제시한 바 있다[5]. 하지만, 이런 연구들은 공기베어링을 이용한 스테이지 자체의 설계와는 조금 거리가 있다.

공기베어링을 이용한 스테이지 자체를 설계하기 위해서는, 동적 특성을 해석하는 연구가 진행될 필요가 있다. 본 연구진의 일부는 급기공의 스테이지의 가속과 감속이 스테이지의 거동 특성에 미치는 영향을 이론적으로 밝힌 바 있으며[6], 스테이지의 진적도나 편평도와 같은 형상 정밀도가 스테이지 거동의 정밀도에 미치는 영향을 해석한 바 있다[7]. 하지만, 에어 스테이지의 안정성에 미치는 근본적인 원인인 공기 햄머링에 대한 연구는 무척 미진한 실정이다.

공기 햄머링은 공기의 압축성 때문에 발생하는 공기 베어링의 고유한 특성으로 선형 연구자들이 햄머링이 발생하지 않도록 설계를 하는 방법들에 대해 연구를 진행해 왔다. Snoeys 등은 햄머링이 발생하지 않도록 곡선 형태의 베어링을 제시한 바 있다[8]. 하지만 이러한 방법은 초정밀을 요구하는 스테이지에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 또한, Tauhiduzzaman 은 초정밀 공작기계용 스핀들에 대해서 에어 햄머링이 일어나지 않는 설계안을 제시한 바 있다[9]. 하지만 원형 스핀들에 대해서 적용한 연구이기 때문에, 스테이지에 대해서 바로 적용하기는 어려운 단점이 있다. 또한 대부분의 햄머링 현상을 줄

이기 위한 방법으로는 작은 급기공을 여러 개 뚫어 햄머링을 줄이는 자성형 급기공 형태의 설계를 제안하고 있는 실정이지만, 자성형 급기공으로만 설계하는 경우에, 강성의 한계가 존재할 뿐 아니라, 가공비가 많이 소요되는 단점이 있어 급기공의 숫자는 줄이면서, 필요한 강성을 확보하며 동시에 햄머링을 줄일 수 있는 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 한 패드 면에 최대 4개의 공기공급 구멍을 이용하며, 동시에 하중 지지 용량을 높이기 위해 급기공 주변으로 포켓을 가공하여 설계하는 스테이지의 설계를 위해, 햄머링이 발생하지 않는 설계 영역을 찾고, 그 방안을 제시하고자 한다. 이를 위해, 에어 스테이지의 내부의 압력을 계산하고, 운동방정식과 연계하여, 동적인 상태에서 햄머링 현상이 발생하는 영역을 이론적으로 규명하고자 한다.

2. 공기 베어링 스테이지의 모델링

2-1. 공기 베어링 스테이지의 구조

본 연구에서 해석대상으로 삼은 공기 베어링 스테이지는 Fig. 1과 같이 이송을 하는 공기 베어링 스테이지와 이송 경로인 가이드 레일로 이루어져 있다. 스테이지는 공급되는 공기로 인해 스테이지와 레일 사이의 얇은 공기막에 의해 부상된 상태에서 y축 방향으로 레일을 따라 이동하게 된다. 이 과정에서 스테이지는 진행 방향인 y축 편심을 제외한 x, z축 편심이 발생하고 x, y, z축 방향의 틸팅 운동 또한 발생하게 된다. 이러한 편심과 틸팅은 스테이지의 이송 정밀도를 나타내는 운동 오차로 볼 수 있다.

스테이지는 한 몸체가 아니고 각 부품들이 용접이 아닌 볼트로 체결되어 T자 형태의 모양을 하고 있다. 이는 정밀도를 높이기 위해, 상하 및 좌우 편심량을 제한하기 위함이다.

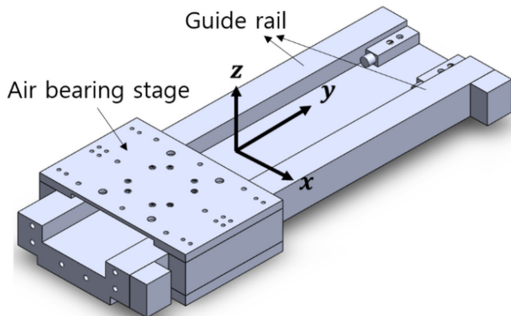


Fig. 1. Air bearing stage and guide rail.

2-2. 스테이지의 유회 영역 지배 방정식 및 경계조건

공기 베어링 스테이지의 유회영역은 스테이지와 가이드 레일 사이이다. 이 유회영역에 형성되는 얇은 공기막 내부의 압력에 의해 스테이지에 가해지는 하중이 지지된다. 이때, 공기막의 지배 방정식은 압축성 유체의 Reynold's equation 으로 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(p h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(p h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{q_{sij}}{\Delta x \Delta y} = 6\mu U \frac{\partial(p h)}{\partial x} + 12\mu \frac{\partial(p h)}{\partial t} \quad (1)$$

이때, 급기공을 통해 들어가는 유량(q_{sij})은 등 엔트로피 과정이라고 가정하여 식 (2)을 적용하였다. 이 유량식은 급기압력과 급기공을 통과한 직후의 압력비에 따라, 최대의 유량 조건을 나타내는 choked 상태와 공급압과 유회영역의 압력비에 의해 유량이 결정되는 unchoked 상태로 구분되어 정의 된다[10].

$$q_{sij} = C_d \cdot A \cdot \left(\frac{p_s}{\sqrt{R \cdot T}} \right) \cdot \left(\frac{2\kappa}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \quad \text{if } \frac{p_{ij}}{p_s} \leq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$q_{sij} = C_d \cdot A \cdot \left(\frac{p_s}{\sqrt{R \cdot T}} \right) \cdot \left(\frac{2\kappa}{\kappa-1} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\left(\frac{p_{ij}}{p_s} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_{ij}}{p_s} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{if } \frac{p_{ij}}{p_s} > \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2)$$

Fig. 2에서 나타낸 바와 같이, 포켓의 내부는 포켓이 아

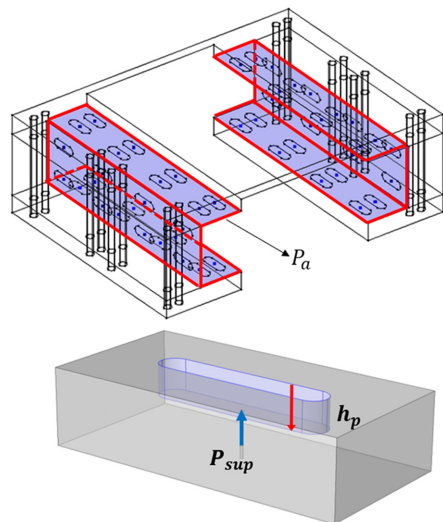


Fig. 2. Modeling of Pocket.

주 깊어지면, 3차원 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 하지만, 본 연구에서는 유힘영역의 틈새에 비해서 아주 깊지 않은 영역에서 계산할 계획이기 때문에, 포켓 내부도 레이놀즈 방정식을 적용하였다. 또한 스테이지의 외부 경계면에서는 대기압 경계조건을 사용하였다.

2-3. 스테이지의 거동을 고려한 틈새 함수

본 연구에서 해석 대상으로 삼은 유힘 영역은 총 6면이기 때문에, 구분을 위하여 Fig. 3과 같이 각 면에 이름을 부여하였다. 각 면의 이름은 두 글자로 이루어져 있으며, 진행방향인 y 방향을 바라보았을 때, 첫번째 글자는 왼쪽을 L, 오른쪽을 R로 명명하였다. 두번째 글자는 각각 위쪽면(T), 중간면(M), 및 아래면(B)을 의미한다. 각 유힘 영역에 대한 틈새 함수는 다음과 같이 스테이지의 편심과 틸팅을 이용하여 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h_{LT} &= C + e_z + y \cdot \tan \phi_x - x \cdot \tan \phi_y \\
 h_{LM} &= C - e_x + y \cdot \tan \phi_z - z \cdot \tan \phi_y \\
 h_{LB} &= C - e_z - y \cdot \tan \phi_x + x \cdot \tan \phi_y \\
 h_{RT} &= C + e_z + y \cdot \tan \phi_x - x \cdot \tan \phi_y \\
 h_{RM} &= C + e_x - y \cdot \tan \phi_z + z \cdot \tan \phi_y \\
 h_{RB} &= C - e_z - y \cdot \tan \phi_x + x \cdot \tan \phi_y
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서, C는 기준 틈새이고 x, y, z는 스테이지의 무게 중심으로부터의 위치를 나타내며, x축 및 z축 방향으로의 편심량과 세 축 방향으로의 틸팅이 모두 고려되었다.

2.4. 스테이지 거동에 대한 운동 방정식

공기 베어링 스테이지는 자중뿐만 아니라 가속 및 감속 과정에서 발생하는 편심 및 틸팅에 의해 반력과 반력 모멘트가 작용하게 된다. 스테이지에 적용되었는 가속 및

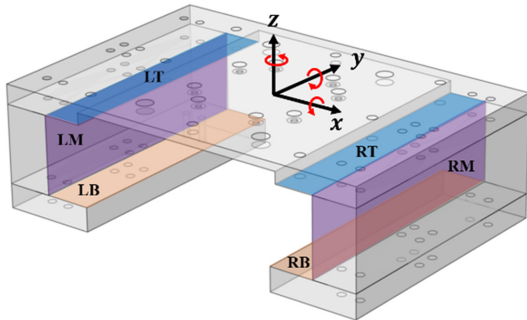


Fig. 3. Coordinate system and names of the pads.

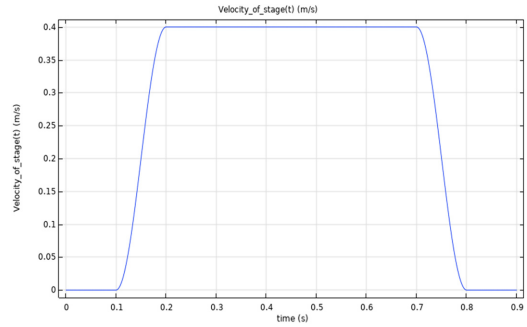


Fig. 4. Velocity of stage.

가속 프로파일은 Fig. 4에 나타난 바와 같이, 0.1 초 동안에는 정지해 있다가, 0.1 초에서 0.2초 사이에 정상 이송속도에 해당하는 0.4 m/s까지 사이클로이드 형태로 가속을 받아 속도가 증가하고, 0.5초동안 등속운동을 한다. 그 이후에 다시 0.1초 사이에 감속되어 속도가 0으로 되는 프로파일에 대해서 해석을 진행하였다. 이 때, 각 패드에서 작용하는 반력과 반력모멘트를 고려하여 진행 방향을 제외한 방향의 편심과 각 축 방향 틸팅의 5자유도의 운동 방정식을 유도하였다.

$$\begin{aligned}
 m \cdot \ddot{x} &= F_{LM,x} + F_{RM,x} \\
 m \cdot \ddot{z} &= F_{LT,z} + F_{RT,z} + F_{LB,z} + F_{RB,z} - m \cdot g \\
 I_x \cdot \ddot{\phi}_x &= M_{RB,x} + M_{LB,x} + M_{RT,x} + M_{LT,x} \\
 I_y \cdot \ddot{\phi}_y &= M_{RB,y} + M_{LB,y} + M_{RT,y} + M_{LT,y} + M_{LM,y} + M_{RM,y} \\
 I_z \cdot \ddot{\phi}_z &= M_{LM,z} + M_{RM,z}
 \end{aligned} \tag{4}$$

3. 해석 결과

3-1. 해석 대상 공기 스테이지 해석 예

본 연구에서 해석 대상으로 삼은 공기 스테이지의 제원을 Table 1에 나타내었다. 급기압력은 2 bar에서 7 bar까지 바꾸어 가면서 계산하였다. 동적인 해석을 통하여 햄머링 현상이 일어난 것을 해석하였다. Fig. 5에는 본 연구에서 해석된 포켓을 갖는 공기 스테이지 베어링의 초기 위치에서의 압력분포 예를 나타내었다.

Fig. 6에는 0.8 초의 운동이 모두 끝난 후의 압력 분포 계산 예를 나타내었다. 시작 위치로부터 계산이 시작되어, 0.8 초 동안에 이동을 완료한 모습을 볼 수 있다. 그림에서 보듯이 포켓 부분에는 높은 압력을 나타내고 있으며, 경계부위는 대기압으로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Table 1. Specification of air stage

Name	Def.	Values	Unit
Top Pad (LT, RT)	W × L	35 × 151	mm × mm
Mid. Pad (LM, RM)	H × L	42 × 151	mm × mm
Bot. Pad (LB, RB)	W × L	35 × 151	mm × mm
No. of Pockets	/pad	8	ea
Pocket Length	-	15	mm
Pocket Width	-	4.5	mm
Pocket Depth	h_p	0~80	μm
Dia. of supply holes	-	0.08	mm
Mass of Slider	m	6.3	kg
Moment of Inertia	I_x	0.015275	$\text{kg} \times \text{m}^2$
Moment of Inertia	I_y	0.042220	$\text{kg} \times \text{m}^2$
Moment of Inertia	I_z	0.050887	$\text{kg} \times \text{m}^2$
Viscosity of air	μ	1.8×10^{-5}	$\text{Pa} \times \text{s}$
Temp. of air	T	25	$^{\circ}\text{C}$

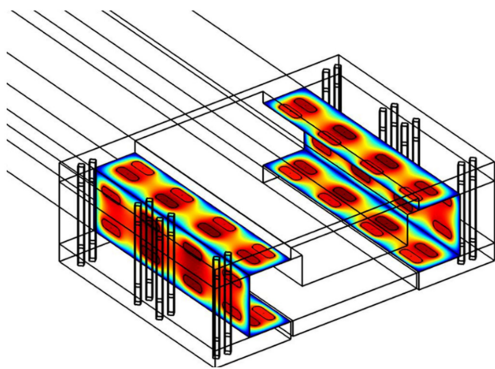


Fig. 5. Example of Pressure Profile ($t = 0\text{s}$).

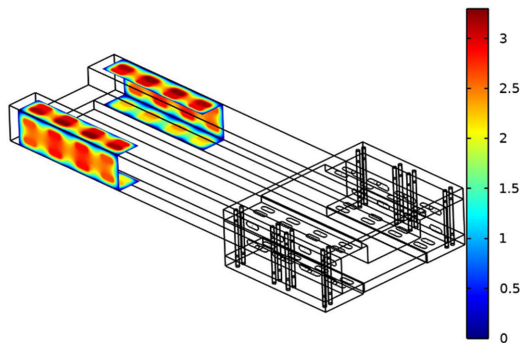


Fig. 6. Example of Pressure Profile ($t = 0.8\text{s}$).

3-2. 포켓이 없는 경우 해석 결과

Fig. 7에는 급기압이 4 bar일 때, 포켓이 없는 스테이지의 x 축 회전 운동 결과를 나타내었다. 본 연구진이 이

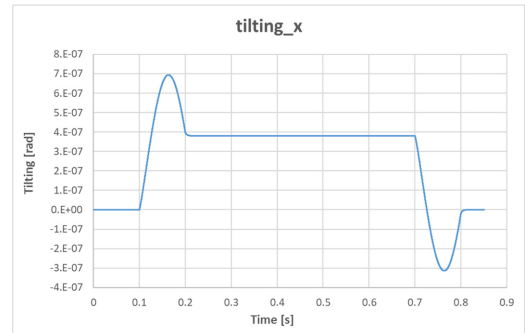


Fig. 7. Tilting of stage at $h_p = 0 \mu\text{m}$.

전연구에서 밝혔듯이[6] 가속하는 과정에서 스테이지의 앞쪽이 들리기 때문에 양의 틸팅값을 갖게 되고, 이후 등속 운동 시엔 일정한 틸팅량을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 마지막의 감속 부분에서는 반대로 스테이지 뒤쪽이 들리기에 음의 틸팅이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 포켓이 없는 경우에는 모든 운동이 안정적이며, 급기압력을 높여도 문제가 없이 Fig. 7과 같은 거동을 보이지만, 본 논문에서는 지면 관계상 이 결과는 생략한다.

3-3. 포켓이 있는 경우 해석 결과

Fig. 8은 공급 압력이 5 bar일 때, 포켓의 깊이의 변화에 따른 x 축 틸팅을 나타내는 그래프이다. 포켓의 깊이가 깊어질수록 틸팅량이 줄어들기 때문에 스테이지의 거동이 점차 안정화되는 것을 알 수 있다. 거동이 안정화되기 때문에 최소 공기막 두께가 점차 증가하는 경향도 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 하지만 공급 압력이 5 bar일 때 포켓 깊이가 50 μm 에 도달하게 되면, 처음 가속구간에서 틸팅 변위가 계속 진동을 일으키면서, 무한정의 반복 변동 운동을 나타내는 것으로 계산되었으며, 이러한 현상을 Fig. 10에 나타내었다. 이러한 현상을 에어 햄머링 현상으로 결과라고 판단할 수 있는 데, 이는 실제 실험상

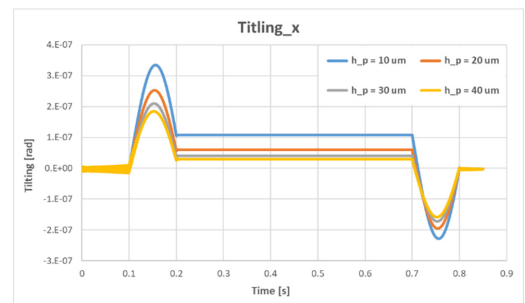


Fig. 8. Tilting of stage at $p_s = 5 \text{ bar}$.

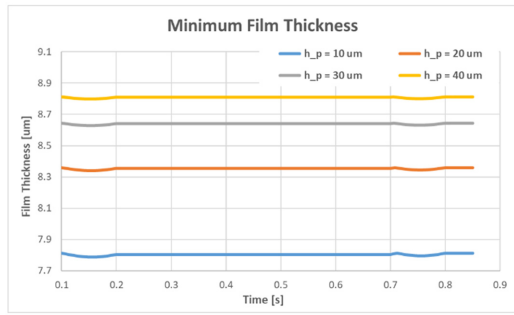


Fig. 9. Minimum Clearances at $p_p = 5 \text{ bar}$.

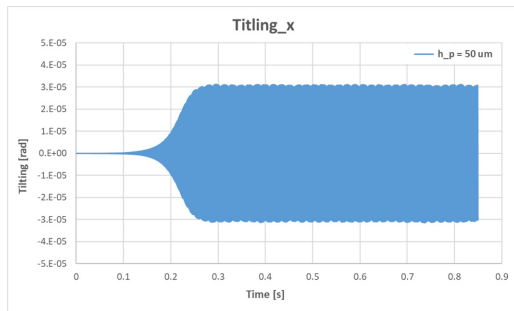


Fig. 10. Tilting of stage at $h_p = 50 \text{ um}$.

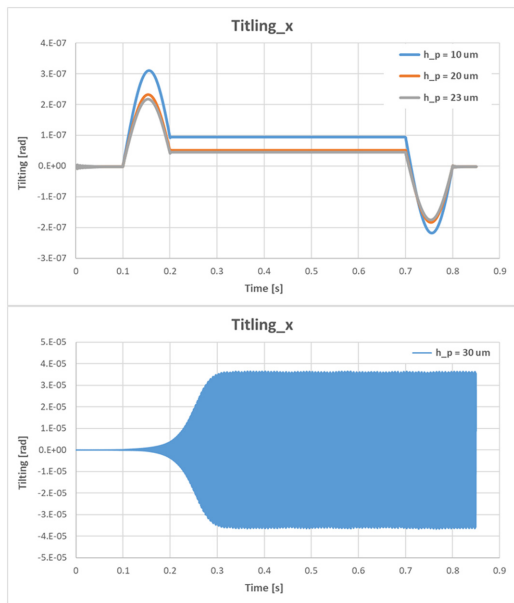


Fig. 11. Tilting of stage at $p_p = 6 \text{ bar}$.

에서는 햄머링 현상이 일어나면, 베어링이 안정화하지 않고, 무한대의 진동을 나타내는 현상을 나타내며, 햄머링

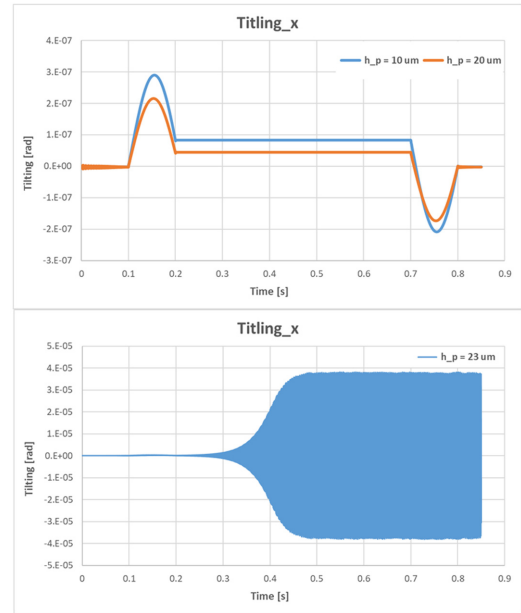


Fig. 12. Tilting of stage at $p_p = 7 \text{ bar}$.

현상이 계산된 것으로 판단해도 무리가 없다고 볼 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12에는 각각 공급 압력을 6 및 7 bar 부가하였을 때, 포켓 깊이에 따른 거동 중 x 축 틸팅의 값을 나타낸 결과이다. 급기압력이 5 bar에서는 포켓 깊이가 50 um에서 햄머링이 처음 발생하였으나, 6 bar에서는 포켓 깊이가 30 um에서 발생하고, 급기압력을 7 bar로 높이면, 포켓 깊이가 23 um에서 발생함을 확인 할 수 있다. 이는 급기압력이 커질수록 햄머링이 발생하는 포켓 깊이가 더 작다는 경험적 결과와 잘 일치하며, 본 연구에서 제안한 방법으로 계산하면, 햄머링이 일어나는 깊이를 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기 베어링 스테이지에서 급기공의 포켓 깊이가 스테이지의 거동에 미치는 영향에 대해 연구 하였다. 포켓 깊이의 변화에 따라 가속과 감속시에 나타나는 스테이지의 x 축 방향의 틸팅량이 변화하는 것을 확인하였으며, 이를 틸팅량이 급격한 진동이 발생하는 영역이 생기면, 이를 햄머링 현상의 시작점으로 정의할 수 있으며, 이를 토대로 포켓 깊이가 스테이지의 에어 햄머링에 미치는 영향에 대해서 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포켓 깊이가 깊어질수록 스테이지의 회전 운동이 줄

어들어 거동이 점차 안정화되는 경향이 있지만, 일정 깊이 이상이 되면 에어 햄머링 현상이 발생하는 것을 해석적으로 확인 가능하다.

2. 급기압력이 높아질수록 에어 햄머링현상은 낮은 포켓 깊이에서 나타난다.

Acknowledgements

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0002092, 2021년 산업혁신인재성장지원사업).

References

- [1] Tian, C., Ming, Z., Yu, Z., Chuxiong, H, "Dynamic Modeling and Analysis of a 3-DOF Ultra-precision Positioning Stage with Air Bearing", *Procedia Engineering*, Vol.16, pp.264-270, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1082>
- [2] Li, Y., Li, J., Xu, C., Wang, L., "Design and Control of a High Acceleration and High Precision Air Bearing Stage," 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011, pp.619-623, <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2011.163>
- [3] Huang, S., "Precise Compensation for Positional Accuracy of Ultra-Precision Air-Bearing Motion Stage Based on the Self-Calibration Method", *IJPEM*, Vol.22, No.6, pp.1039-1048, 2021, <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00526-w>
- [4] Gao, W., Arai Y., Shibuya, A., Kiyono, S., Park, C.H., "Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage", *Precision Engineering*, Volume 30, Issue 1, 2006, pp.96-103, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2005.06.003>
- [5] Ro, S.K., Kim, S.H., Kwak, Y., Park, C.H., "A linear air bearing stage with active magnetic preloads for ultraprecise straight motion", *Precision Engineering*, Vol.34 No.1 pp.186-194, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.06.010>
- [6] Park, S.J., Lee, J.H., Park, S.S., Kim, G.H., "Effect of the Acceleration and Deceleration on the Dynamic Characteristics of an Air Stage", *Tribol Lubr*, Vol.36, No.1, pp39-46, 2020. <https://doi.org/10.9725/kts.2020.36.1.39>
- [7] Ryu, D., Lee, J.H., Park, S.S., Kim, G.H., "Effect of Shape Error of an Air Stage on Motion Precision", *Tribol Lubr*, Vol.36, No.2, pp68-74, 2020. DOI <https://doi.org/10.9725/kts.2020.36.2.68>
- [8] Snoeys, R., R.Al-Bender, F., "Development of improved externally pressurized gas bearings.", *Journal of Mechanical Science & Technology*; Vol. 1, No.1, pp.81-88, 1987, <https://doi.org/10.1007/BF02953383>
- [9] Tauhiduzzaman, M., Yip, A., Veldhuis, S.C., "Form error in diamond turning", *Precision Engineering*, Vol.42, pp.22-36, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.03.006>
- [10] Kim, W., Park, S., Han, D., "A Study on the Dynamic Characteristics of an Externally Pressurized Gas Bearing", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.7, No.2, pp.51-60, 1991, <https://doi.org/10.9725/kstle.1991.7.2.051>