Tribol. Lubr., Vol. 36, No. 2 April 2020, pp. 68~74
Tribology and Lubricants

ISSN 2713-8011(Print) • 2713-802X(Online)
http://Journal.tribology.kr

DOI https://doi.org/10.9725/kts.2020.36.2.68

공기 스테이지의 형상 오차가 운동정밀도에 미치는 영향

류대원[1] • 이재혁[1] • 박상신[2†] • 김규하[3]

[1]영남대학교 대학원 기계공학과 석사과정생
[2]영남대학교 기계공학부 교수
[3]㈜트리엔 기술연구소 소장

Effect of Shape Error of an Air Stage on Motion Precision

Daewon Ryu[1], Jae Hyeok Lee[1], Sang-Shin Park[2†] and Gyu Ha Kim[3]

[1]Master Student, Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University
[2]Professor, School of Mechanical Engineering, Yeungnam University
[3]Director of Research, Tri-N Co., Ltd.

(Received January 30, 2020 ; Revised March 28, 2020 ; Accepted March 28, 2020)

Abstract – In this study, the effect of the shape error of a guideway on the movement of a stage that uses an air bearing is analyzed. The shape error of moving parts supported by the air bearing is known not to affect the vibrations of moving parts as much as the magnitude of the shape error. This is called the "averaging effect." In this study, the effect of shape error on a guideway, as well as the averaging effect of an air-bearing system, is analyzed theoretically using a dynamic-analysis program. The dynamic-analysis program applies a commercially available code in COMSOL and solves the Reynolds equation between the stage and the guideway, along with the equation of motion of the stage. The stage is modeled as a two-degree-of-freedom system. The shape error is applied to the film thickness function in the form of a sine wave. The stage movement is analyzed using the fast Fourier transform process. The eccentricity and tilting are found to be proportional to the amplitude of the shape error of the guideway. Stage vibrations are less than 10% of the amplitude of the shape error on the guideway. This means that the averaging effect of the air bearing is verified quantitatively. Moreover, if the air supply position matches the shape error in the guideway, there is a notable change in eccentricity and tilting.

ⓒ Korean Tribology Society 2020. 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), shape error(형상 오차), averaging effect(평균화 효과)

Nomenclature

A : Area of supply hole (m^2) (급기공 면적)
A_g : Magnitude of shape error on guideway (μm) (가이드 형상 오차 크기)
A_s : Magnitude of shape error on stage (μm) (스테이지 형상 오차 크기)
a : Acceleration of stage (m/s^2) (가속도)
C : Clearance (μm) (틈새)
C_d : Discharge constant (방출계수)
e : Eccentricity of stage (m) (편심량)
F : Bearing reaction force (N) (베어링 반력)
f : Frequency (1/s) (주파수)

†Corresponding author: Sang-Shin Park
Tel: +82-53-810-3538, Fax: +82-53-810-4627
E-mail: pss@ynu.ac.kr
https://orcid.org/0000-0002-1201-558X
https://orcid.org/0000-0002-6480-4951 (Daewon Ryu[1])

h : Height (m)(틈새)
I : Inertia of moment (kg·m^2) (관성모멘트)
L : Length (m) (스테이지 길이)
M : Bearing reaction moment (N·m) (모멘트)
N_g : Number order on guideway (한 블록당 가이드 형상 오차 개수)
N_s : Number order on stage (한 블록당 스테이지 형상 오차 개수)
P : Non-dimensionalized pressure (압력)
p_s : Supply pressure (N/m^2) (공급압)
q_{sij} : Supplied flow rate (kg·m^3)
R : Gas constant (J/kg·K) (기체상수)
T : Temperature (K) (온도)
V : Velocity of stage (m/s) (스테이지 속도)
κ : Specific hear ratio of air (비열비)
ϕ : Tilting of stage (rad) (틸팅각)
μ : Viscosity (Pa·s) (점도)
λ : Wavelength (m) (파장)

1. 서 론

최근 디스플레이에 적용되는 박막 유리, 반도체 등의 수요가 증가하면서 이를 정밀하게 이송하면서 측정과 가공이 가능한 이송시스템에 대한 수요가 증가하고 있다. 정밀한 이송이 필요한 시스템에서는 공기베어링을 이용하여 스테이지가 제품을 이송하도록 설계가 이루어지고 있다.

공기 베어링에서는 상대 운동이 발생하는 면의 속도 차이와 틈새에 따라서 압력이 발생한다. 스테이지는 정지해 있는 가이드와 운동하는 스테이지의 속도 차이가 크지 않아 압력이 크게 발생하지 않고, 공기베어링의 하중지지력이 작다. 따라서 공기 베어링의 하중지지력을 키우기 위해 외부에서 가압된 공기를 스테이지와 가이드의 틈새에 공급하는 정압 베어링의 원리를 적용하여 스테이지를 부상시킨다[1~2]. 스테이지는 이송 방향을 제외한 방향으로 틈새만큼 거동이 발생할 수 있고 이러한 이송 오차가 발생한다.

기존의 접촉베어링이 적용된 스테이지의 경우, 가이드의 형상 오차와 변형이 스테이지의 이송 오차로 직접 발생하는 걸 확인할 수 있고, 이를 측정하고 감소시키기 위한 연구가 이루어져 왔다[3~4]. 하지만, 공기 베어링 스테이지는 스테이지와 가이드사이의 얇은 유막이 지지하기 때문에 스테이지는 가이드의 형상 오차보다 작은 진폭의 이송 오차가 발생하는 평균화 효과가 발생한다[5]. 또한, 가이드의 형상 오차가 스테이지의 이송 오차에 미치는 영향을 확인하기 위한 연구를 진행하였다[6]. Ro 등은 자력으로 예하중을 주고 이를 제어하기 위해 코일을 추가한 공기 베어링으로 설계된 선형 운동 스테이지를 제안하고, 제어에 성공한 바 있다[7].

하지만, 기존의 공기베어링 스테이지에 관한 연구들은 공기베어링의 강성, 감쇠를 상수로 설정하고, 모터의 제어 성능, 조립 시 발생하는 공차가 이송 오차에 미치는 영향에 대한 해석과 실험에 집중되어 있기 때문에, 공기베어링의 윤활 성능이 스테이지에 미치는 정확한 영향을 파악하는데 어려움이 있었다[8~10].

공기베어링의 강성, 감쇠는 틈새와 속도에 따라 비선형적으로 변동하기 때문에 이를 고려한 비선형 해석에 대한 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 공기베어링의 윤활 성능과 스테이지의 이송 정밀도의 영향을 정확하게 파악하기 위해 스테이지와 가이드 사이의 윤활면을 모델링하고 급기 유량을 고려한 레이놀즈 방정식과 운동방정식을 매 시간 계산하는 비선형 해석 프로그램을 개발하여 스테이지의 이송 정밀도를 평가하였다. 이후 가이드의 면에 형상 오차를 적용하고 가이드의 형상 오차에 따라 스테이지의 거동을 FFT처리하여 스테이지에 발생하는 진동을 분석하여 형상오차가 성능에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 공기 베어링 스테이지 윤활 및 틈새 함수

2-1. 공기 베어링 스테이지의 구조

공기베어링 스테이지는 Fig. 1과 같이 이송 방향의 가이드와 부품을 이송하는 스테이지로 구성되어 있다. 스테이지는 가이드를 따라서 x축 방향으로 움직이고, 가이드 사이에 얇은 유막으로 부상된 상태에서 마찰 없이 부

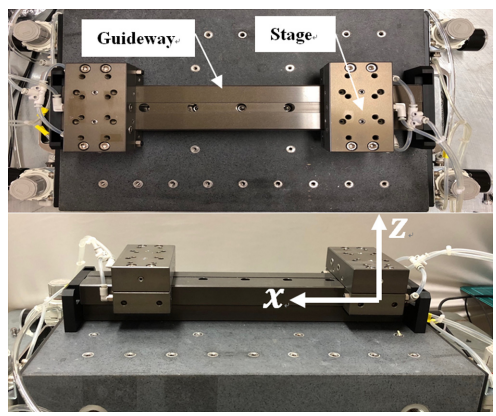

Fig. 1. Air bearing stage.

품을 이송하게 된다. 이송 과정에서 발생하는 외력과 가공 오차는 스테이지의 y,z축 방향의 편심과 x,y,z축 방향의 틸팅이 틈새만큼 발생할 수 있고 이를 스테이지의 운동 오차로 정의한다. 스테이지의 운동 오차는 부품에 진동으로 전달되고 마찰을 발생시킬 수 있다.

2-2. 스테이지 윤활 면 지배 방정식

공기베어링 스테이지는 스테이지와 가이드사이의 유막의 압력에 의해 지지된다. 이때, 유막의 지배방정식은 Reynolds' equation으로 식 (1)과 같다.

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

2-3. 스테이지의 유량 및 경계조건

급기공을 통해 들어가는 유량은 다음과 같은 식을 통해 계산된다. 유량은 공급압과 윤활면의 압력비로 인해 계산되고, 압력비에 따라 Choked, UnChoked조건으로 나뉘어 계산된다.

$$q_{sij}=C_d\cdot A\cdot\left(\frac{p_s}{\sqrt{R\cdot T}}\right)\cdot\left(\frac{2\kappa}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}}\frac{p_i}{p_s}\le\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$
$$q_{sij}=C_d\cdot A\cdot\left(\frac{p_s}{\sqrt{R\cdot T}}\right)\cdot\left(\frac{2\kappa}{\kappa-1}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot\left(\left(\frac{p_i}{p_s}\right)^{\frac{2}{\kappa}}-\left(\frac{p_i}{p_s}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right)^{1/2}$$
$$\frac{p_i}{p_s}>\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2)$$

스테이지는 마찰이 발생하게 되면 윤활면에 마모가 발생하고 마모는 스테이지의 진동을 유발할 수 있다. 따라서, 정밀 이송이 필요한 스테이지는 마찰이 없는, 부상된 상태에서 작동해야 한다. 또한, 스테이지의 이송 속도는 스테이지를 부상 시킬 만큼의 동압 효과를 발생시키기 충분하지 않다. 따라서 스테이지의 윤활면에는 압축 가스를 공급하는 외부가압공기베어링의 원리가 적용되었다. 스테이지의 경계조건은 모서리 부분의 압력과 급기공의 속도로 적용되어 있다. 모서리 부분의 압력은 대기압으로 설정되었으며, 급기공 부분의 유체 속도는 급기유량을 통해 계산된다.

2-4. 형상 오차를 고려한 틈새함수

스테이지는 이송 방향을 제외하고 y, z 축 방향 편심 (e_y, e_z)과 x, y, z 축 방향 틸팅 (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z)의 5자유도로 모델링을 진행하였다. 스테이지와 가이드 사이의 틈새 함수는 스테이지의 편심과 틸팅의 함수로 식(3)으로 표현된다.

윤활 면의 형상 오차는 정현파(sine)의 형태로 적용되었다. 형상 오차는 가이드의 형상 오차와 스테이지의 형상 오차 2가지로 나뉘어 적용할 수 있다. 스테이지의 형상 오차는 스테이지의 거동에 따라 움직이기 때문에 시간이 변수로 적용되지 않지만 가이드의 형상 오차는 스테이지의 거동에 따라 움직이기 때문에 시간에 따른 함수로 설정되었다. 스테이지와 가이드 제1평면의 형상 오차를 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

$$h_1=C+e_z+y\tan\phi_x-x\tan\phi_y+A_{1,g}\sin(2\pi\cdot N_{1,g}\cdot z+Vt)$$
$$+A_{1,s}\sin(2\pi\cdot N_{1,S}\cdot z)h_2=h_3=C \quad (3)$$

틈새함수에서의 C는 기준틈새이다. 스테이지는 가이드 위에 기준 틈새만큼 부상한 상태에서 편심과 틸팅만큼 진동한다. 기준 틈새는 정압 효과로 발생하는 압력과, 가공 정밀도를 고려하여 10 μm으로 설정되었다. 형상 오차에 따른 해석 결과를 보기 위해 설정한 윗면(제1평면)을 제외한 옆면에서는 틈새함수가 기준틈새와 같음을 확인

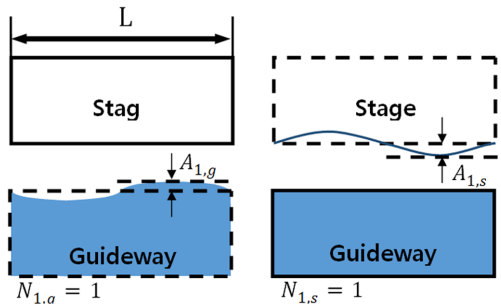

Fig. 2. Shape error on guideway and stage.

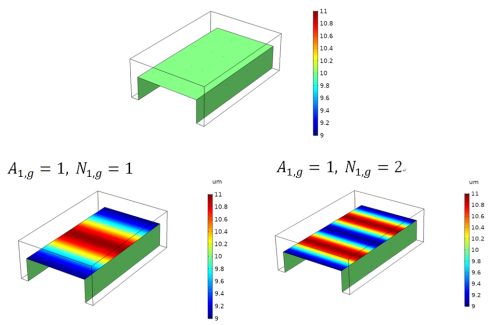

Fig. 3. Film Thickness.

할 수 있다.

여기서 $A_{1,g}$, $A_{1,s}$는 가이드와 스테이지의 형상 오차의 진폭을 나타내는 변수이다. $N_{1,g}$, $N_{1,s}$는 스테이지의 길이당 형상 오차의 개수이다. 즉 형상 오차의 주기에 대한 변수 이다. Fig. 3은 형상 오차가 적용 되었을 때의 스테이지와 가이드 사이의 틈새를 나타낸다.

3. 수치해석

3-1. 공기 베어링 스테이지 모델링

본 연구에서는 COMSOL프로그램을 이용하여 스테이지의 모델링을 진행하였다.

Fig. 4에서 COMSOL프로그램에서 모델링된 스테이지와 표시된 윤활면을 확인할 수 있다. 운동방정식에 필요한 관성모멘트와 무게중심을 계산하기 위해 전체 스테이지를 모델링하였다. 윤활 계산 영역은 2차원 면으로 제한되어 있기 때문에 해석 시간을 줄일 수 있다

3-2. 공기 베어링 스테이지 운동 방정식

스테이지의 속도에 따라 윤활 면의 압력 분포가 변하기 때문에 가속 구간, 등속 구간 그리고 감속 구간의 속도를 윤활 면의 상대 속도에 적용하였다. 스테이지는 1.5초동안 1 m/s로 가속하고, 2초 동안 1m/s로 등속 운동한 후에, 1.5초 동안 0 m/s로 감속하고, 2초 동안 정지 상태를 유지하게 된다. Fig. 5에서 스테이지의 가속도 프로파일을 확인할 수 있다.

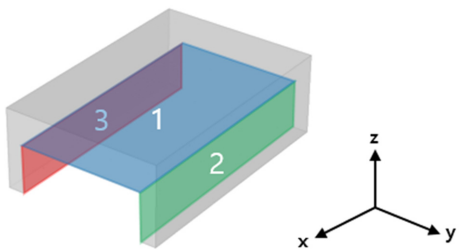

Fig. 4. Modeling and Lubrication area of stage.

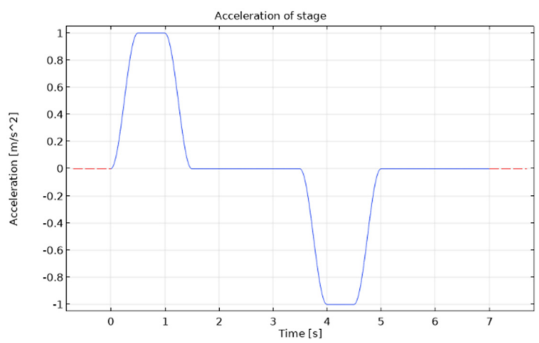

Fig. 5. Acceleration of stage.

윤활방정식을 계산하여 스테이지와 가이드 사이의 유막의 압력을 계산할 수 있다. 이때, 압력을 적분하여 스테이지를 지지하는 베어링 반력과 모멘트가 계산되고, 베어링 반력과 모멘트는 운동방정식에 적용된다. 베어링 반력과 모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$
\begin{aligned}
F_y &= \int p_2 dA_2 - \int p_3 dA_3 \\
F_z &= \int p_1 dA_1 \\
M_x &= \int p_1 \cdot y dA_1 - \int p_2 \cdot z dA_2 + \int p_3 \cdot z dA_{3,p} \\
M_y &= -\int p_1 \cdot x dA_1
\end{aligned} \tag{4}
$$

스테이지의 운동방정식은 베어링 반력과 모멘트로 구성된다. 스테이지의 각 축방향으로의 운동방정식은 다음과 같다. y방향 운동방정식에서 z는 원점에서부터 무게중심까지의 거리이다.

$$
\begin{aligned}
m \cdot \ddot{e}_y &= F_y \\
m \cdot \ddot{e}_z &= F_z - m \cdot g \\
I_{xx} \ddot{\phi}_x &= M_x \\
I_{yy} \ddot{\phi}_y &= M_y + m \cdot a_x \cdot z \\
I_{zz} \ddot{\phi}_z &= M_z
\end{aligned} \tag{5}
$$

운동 방정식을 해석하기 위해 유한요소 방법 기반의 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 사용하였고, 시간 해석 방법으로는 MUMPS방법을 사용하였다. 해석 시 절대 허용 오차를 0.01%, 연속 반복에 대한 상대 허용 오차를 0.1%로 설정하여 수렴 기준을 잡았다. 또한 Time Stepping에서 BDF방법과 Newton-Rapson 반복 방식을 함께 사용하도록 하여 해석을 진행하였다.

4. 해석 결과

4-1. 형상 오차 없는 해석 결과

형상 오차가 없는 스테이지의 해석 결과를 확인할 수 있다. Fig. 6에서 형상 오차가 없는 스테이지의 z축 평행운동 결과를 확인할 수 있다. Fig. 7에서는 스테이지의 y축 회전 운동 결과를 확인할 수 있다. 가속 구간에서 스테이지는 z축 방향으로 상승하고 등속 구간에서 z축 편심이 일정하게 유지되고 감속 구간에서는 z축 편심이 감

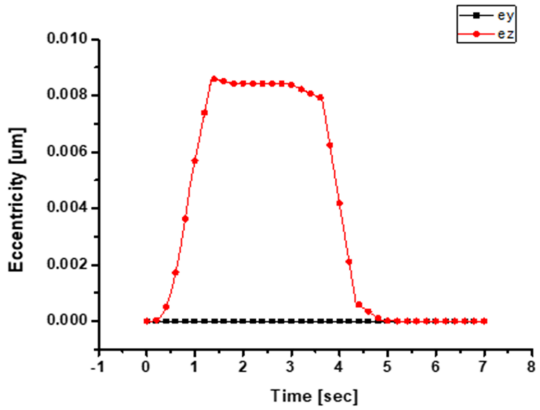

Fig. 6. Eccentricity of stage.

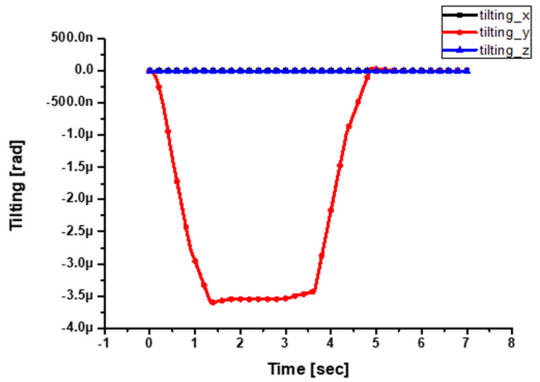

Fig. 7. Tilting of stage.

소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 스테이지가 관성력에 의해 기울어진 상태에서 움직이면서 동압 효과로 인한 부상력이 발생하기 때문이다. 동압 효과는 스테이지와 가이드의 상대속도에 의해 결정되므로, 편심과 틸팅은 속도 프로파일과 동일한 경향을 보인다.

4-2. 형상 오차(가이드)에 따른 해석결과

스테이지와 가이드의 형상 오차는 삼각 함수의 형태로 틈새 함수에 적용되었다. 스테이지는 가이드의 표면을 따라 움직이기 때문에 스테이지는 형상 오차를 따라서 진동하게 된다. Fig. 8은 스테이지의 z축 방향 편심을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 스테이지의 거동은 형상 오차의 파장과 진폭에 따라서 변하게 된다. 이때, 발생하는 스테이지의 진동을 FFT처리하여 분석하였다. 형상 오차는 제 1평면에만 적용되었다. Fig. 9는FFT 처리된 스테이지의 거동을 파장에 따라서 그린 그래프이다. 거동은 파장에 따라 결정된 주파수에서 이루어진 것을

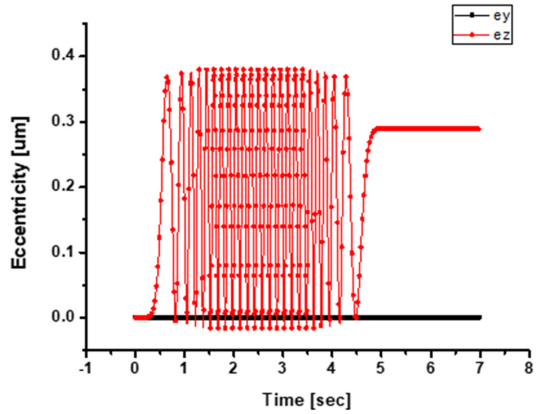

Fig. 8. Vibration of stage.

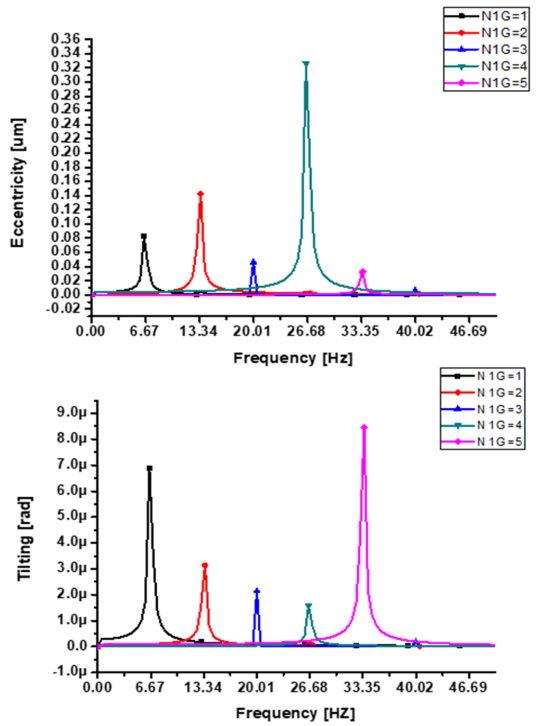

Fig. 9. Eccentricity and Tilting of stage following number of shape error on guideway.

확인할 수 있으며, 이때 주파수는 다음과 같이 스테이지의 속도와 길이를 이용하여 계산된다

$$f = \frac{v}{\lambda},\ \lambda = \frac{L}{N_{1,g}} \tag{6}$$

편심량에 대해서 FFT 처리된 그래프를 보게 되면 $N_{1,g}=4$일 때 편심량이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 본 연

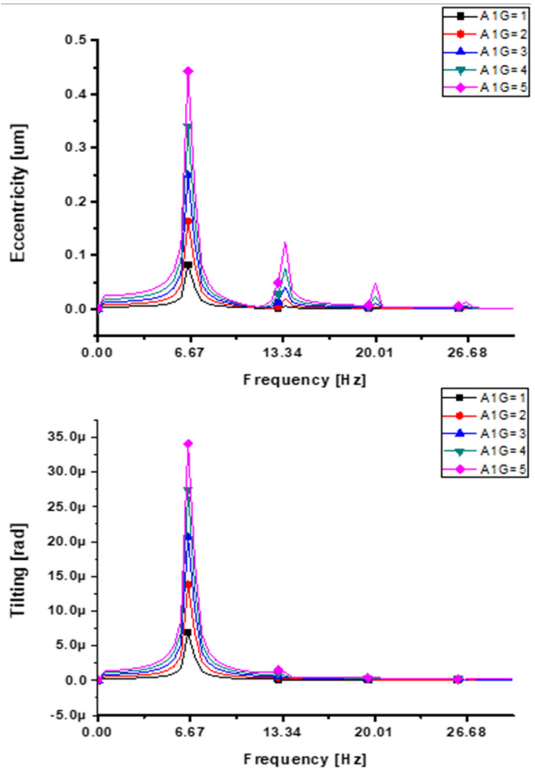

Fig. 10. Eccentricity and Tilting of stage following amplitude of shape error on guideway.

구에서 사용된 스테이지의 급기공의 위치가 가이드의 형상 오차의 배열과 일치하면서 이러한 현상이 나타나는 것으로 보인다. 이를 통해 스테이지의 급기공의 위치나 배열이 이송정밀도에 있어서 중요한 변수로 작용됨을 알 수 있었다. 마찬가지로 틸팅을 FFT처리한 그래프를 보면, 급기공과 가이드의 형상 오차의 배열 때문에 $N_{1,g}=4$에서 틸팅값이 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 스테이지의 거동을 FFT처리한 후 각 가이드 형상 오차의 진폭의 크기에 따라 나타낸 그래프이다. 편심량에 대해 FFT한 그래프를 보게 되면, 스테이지의 거동은 각각의 형상 오차의 진폭의 크기에 대해 약 10% 미만의 편심량을 보이고 있다. 이는 이론적으로 설명하는 평균화 효과를 해석적으로 알 수 있는 부분이다. 또한 최대 편심량을 보면 형상 오차의 진폭이 커질수록 그에 따라 스테이지의 거동도 같이 커지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 공기 베어링 스테이지의 거동을 계산하고 윤활 면의 형상 오차가 스테이지의 이송 정밀도에 미치는 영향을 확인하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 스테이지의 관성력과 동압효과로 인해 스테이지는 기울어진 상태에서 거동하게 된다. 스테이지의 속도가 0이 되면 스테이지는 급기 유량에 의해서만 지지되며 기울어지지 않는다.
2. 가이드에 형상 오차가 있을 때, 스테이지는 형상 오차의 파장과 스테이지의 속도에 의해 계산되는 주파수에의 이송 오차가 진동으로 발생한다. 이때, 스테이지의 이송 오차는 형상 오차 크기의 10%크기의 진동으로 발생하게 되고, 평균화 효과가 발생하는 것을 해석적으로 확인하였다.
3. 가이드의 형상 오차의 파장에 따라 해석을 진행한 결과, 급기공의 위치와 형상 오차의 위상이 일치하는 케이스에서 평행 운동이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 틸팅의 경우, 급기공의 위치와 형상 오차의 위상이 일치할수록 감소한다.
4. 가이드의 형상 오차의 진폭에 따라 해석을 진행한 결과, 편심과 틸팅 모두 진폭에 비례하는 것을 확인할 수 있다.

Acknowledgements

이 연구는 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (P0002092, 2020년 산업전문인력역량강화사업)

References

[1] Song, M. S., Azam, S., Jang, J. Y., Park, S. S., “Effect of Shape Errors on the Stability of Externally Pressurized Air Journal Bearings using Semi-implicit scheme”, *Tribology International*, Vol.115, pp.580-590, 2017, https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06. 037

[2] Baek, H., Moon, J. S., Park, S. S., Park, J. M., “Development of a Measuring Device for Coefficient of Friction between Connection Parts in Vehicle Head Lamps”, *Tribol. Lubr.,* Vol. 35, No. 1, pp. 59-64, 2019, https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.1.59

[3] 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

[4] Ro, S. K., Ehmann, K. F., Yoon, H. S., Park, J. K., “Static and Dynamic Characteristics of Magnetically

Preloaded Air Bearing Stage for a 3-Axis Micro-Machine Tool", Proc. Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp.468-472, 2005, https://doi.org/10.1063/1.2884925

[5] Xue, F., Zhao, W., Chen, Y., Wang, Z., "Research on Error Averaging Effect of Hhydrostatic Guideways", *J. Precision Engineering*, Vol.36, Issue 1, pp.84-90, January 2012, https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.007

[6] Oh, J. S., Khim, G., Park, C. H., Chung, S. J., Lee, S. K., Kim, S. J., "Accuracy Simulation of the Precision Linear Motion Systems", *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol.28, No.3, pp275-284, 2011, http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01598623

[7] Ro, S. K., Kim, S., 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, January 2010. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.06.010

[8] Khim, G., Oh, J. S., Park, C. H., "Analysis of 5-DOF Motion Errors Nnfluenced by the Guide Rails of an Aerostatic Linear Motion Stage" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.15, Issue 2, pp. 283-290, February 2014, https://doi.org/10.1007/s12541-014-0336-7

[9] Jeong, J. H., Khim, G., Oh, J. S., Park, C. H., "5 D.O.F. Free Vibration Response Analysis of Linear Stage", Proc. of the Korean Society for Precision Engineering, pp. 432-432, 2015, www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06600851

[10] Khim, G., Park, C. Ho., Shamoto, E., Kim, S. W., "Prediction and compensation of motion accuracy in a linear motion bearing table" *Precision Engineering* 35, No.3, pp.393-399, 2011, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635910001868