

# 요 모션 갠트리 제어 시 공기베어링 스테이지의 리플 보상

안다훈<sup>1</sup>, 이학준<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계자동차공학부, <sup>2</sup>한국생산기술연구원 지능형생산시스템연구부

## Ripple Compensation of Air Bearing Stage upon Gantry Control of Yaw motion

Dahoon Ahn<sup>1</sup>, Hakjun Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Intelligent manufacturing R&D group, Korea Institute of Industrial Technology

**요약** 평판 디스플레이 제조 공정에서 대상물의 위치 결정을 위해 고정밀 평면 모션 스테이지를 사용한다. 이 유형의 스테이지는 일반적으로 마찰이 없는 선형 모터와 에어 베어링을 사용하며, 고정밀 위치 센서로 레이저 간섭계를 사용한다. 스테이지의 불가피한 기생 운동에 의해 야기되는 요 모션 오차는 위치 결정 대상체의 향 변화를 의미하므로, 스테이지의 성능과 공정 정밀도 향상을 위해 요 모션 오차의 실시간 동적 보정은 매우 중요하다. 요 모션 오차 보상에는 갠트리 제어가 일반적이며, 이 방법을 공기베어링 가이드를 사용하는 스테이지에 적용하기 위해서 회전 모션을 허용하는 유연기구가 스테이지에 적용된다. 본 논문은 공기베어링과 유연기구를 갖춘 H형 XY 스테이지의 정속 구동 성능을 개선하는 방법을 제안한다. 유연기구를 포함한 스테이지의 갠트리 제어 시 선형 모터로부터 발생하는 상호 리플의 발생 원인을 분석하고, 이러한 상호 리플을 보상하는 방안으로 적응 학습 제어를 제시한다. 제시 방안의 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하여, 보상 제어를 통해 속도 리플이 약 22 % 수준으로 감소함을 확인하였다. 그리고 요 모션 오차가 발생하는 스테이지 상태를 가정하여 리플 저감 효과를 검증하였다.

**Abstract** In the manufacturing process of flat panel displays, a high-precision planar motion stage is used to position a specimen. Stages of this type typically use frictionless linear motors and air bearings, and laser interferometers. Real-time dynamic correction of the yaw motion error is very important because the inevitable yaw motion error of the stage means a change in the specimen orientation. Gantry control is generally used to compensate for yaw motion errors. Flexure units that allow rotational motion are applied to the stage to apply this method to a stage using an air-bearing guide. This paper proposes a method to improve the constant speed motion performance of a H-type XY stage equipped with air bearing and flexure units. When applying the gantry control to the stage, including the flexure units, the cause of the mutual ripple generated from the linear motors is analyzed, and adaptive learning control is proposed to compensate for the mutual ripple. A simulation was performed to verify the proposed method. The speed ripple was reduced to approximately the 22 % level. The ripple reduction was verified by simulating the stage state where yaw motion error occurs.

**Keywords** : Air Bearing Stage, Compensation, Flexure, Gantry Control, Mutual Ripple, Yaw Motion

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C157468-01).

\*Corresponding Author : Hakjun Lee(Korea Institute of Industrial Technology)

email: hak1414@kitech.re.kr

Received September 15, 2020

Revised October 12, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

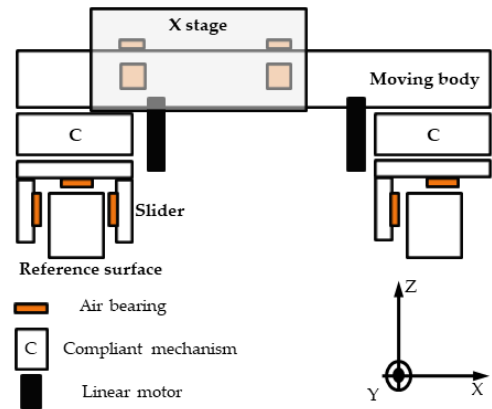
## 1. 서론

평판 디스플레이 제조의 리소그래피 공정에서는 H 형태의 XY 평면 모션 스테이지와 같은 고정밀 시스템이 유리 패널의 위치 결정에 사용된다. XY 스테이지는 이송 대상물을 평면 상에서 임의의 위치로 이송하기 위해 가로축인 X축 또는 세로축인 Y축으로 기구부의 모션을 수행한다. 이러한 용도의 XY 스테이지는 일반적으로 고정밀을 위해 마찰이 없는 선형 모터를 구동기로 사용하고 공기베어링을 안내기구로 사용한다 [1-3]. 공기베어링 스테이지는 스택 형태 [4], 적층 및 개방 형태 [5, 6], 윈도우 형태 [7], H 형태 [8, 9] 등 다양한 구조를 가지고 있다. 특히 H 형태는 구조가 단순하고 움직이는 부품의 질량 중심이 낮기 때문에 널리 사용된다.

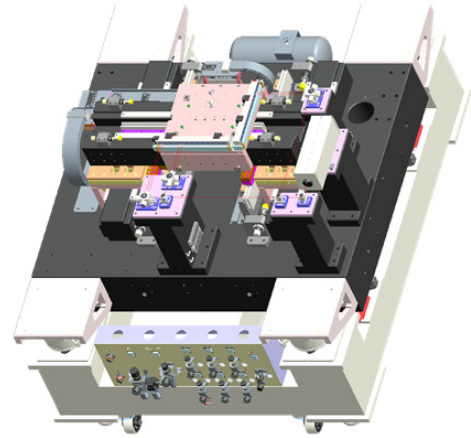
공기베어링은 기준면으로부터 수~수십 마이크로미터 떨어져 고압의 공기를 불어내는 패드에 의해 높은 강성으로 스테이지의 모션을 안내하지만, 여러 가지 요인으로 인해 기생 운동이 발생할 수밖에 없다. 특히 요 모션 오차는 XY 평면에 상에서 기구부의  $\theta_z$  방향 회전량으로 정의되며 이는 이송 대상물인 유리 패널의 향 변화를 의미한다. 따라서 요 모션 오차의 실시간 동적 보정은 스테이지의 정밀도와 공정 성능의 향상을 위해 매우 중요하다.

요 모션 오차를 보상하는 방법 중 하나인 갠트리 제어 [10]는 일반적으로 널리 사용되고 있으나, 그 대상체가 공기베어링 가이드를 사용하는 스테이지일 경우 공기 베어링의 손상 또는 강성이 저하하는 문제를 유발할 수 있다. 따라서 에어 베어링의 굽힘을 방지하기 위해 기구부에 요 모션을 허용할 수 있는 메커니즘을 구성하며, 고정밀도를 유지하기 위해서는 마찰이 없는 유연기구가 가장 좋은 방법이라 볼 수 있다[11].

유연기구가 채용된 H-type XY 공기베어링 스테이지에 갠트리 제어를 적용하면 동적으로 요 모션 오차를 보상하면서 정밀도 성능을 높일 수 있다. 그러나 이와 동시에 스테이지를 구동하기 위한 선형 모터에서 힘 리플이 증가한다. 따라서 본 논문에서는 H-type XY 공기베어링 스테이지의 갠트리 제어시 발생하는 힘 리플을 모델링하고, 시뮬레이션을 통해 이를 저감하는 방안을 제안한다.



(a)



(b)

Fig. 1. H-type XY air bearing guide stage, (a) Conceptual diagram, (b) 3D drawing of the total system.

## 2. 본론

### 2.1 공기베어링 스테이지

본 연구에서 사용한 공기베어링 스테이지는 평판 디스플레이 유리 패널을 취급하며, 요 운동 오차 보상 검증을 위한 파일럿 모델로서 행정 거리는 XY 평면 상에서 200 mm × 200 mm 이다. H형 구조는 X 축과 Y 축을 따라 공기 베어링 기준면을 가지고 있다. Fig. 1.과 같이 3 개의 긴 화강암 블록을 사용하며, 그 중 하나는 X 축을 따라 배치된 크로스빔으로서 X 축을 따라 이동하는 X-슬라이더의 안내 기준면이 된다. 나머지 둘은 Y 축을 따라 평행하게 배치되며 Y 축을 따라 이동하는 크로스빔과

Y-슬라이더의 안내 기준면이 된다. 스테이지는 Y축과 평행한 방향으로 추력을 내는 2 개의 선형 모터와 X축을 따라 평행한 방향으로 추력을 내는 1 개의 선형 모터가 있다. 선형모터는 모두 공심형으로 철심과 영구자석 간의 코깅리플이 없어 정속 구동 시 고정밀 구현이 가능하도록 하였다.

위치 제어를 위해 3 개의 레이저 간섭계가 구성되어 있으며, 기구부 상단에 배치된 2개의 평면거울을 이용하여 위치 신호를 되먹임한다. 따라서 이송 대상물의 XY 평면상의 위치 및  $\theta_z$  방향의 모션을 실시간으로 측정하여 제어할 수 있다.

## 2.2 공기베어링과 갠트리 제어

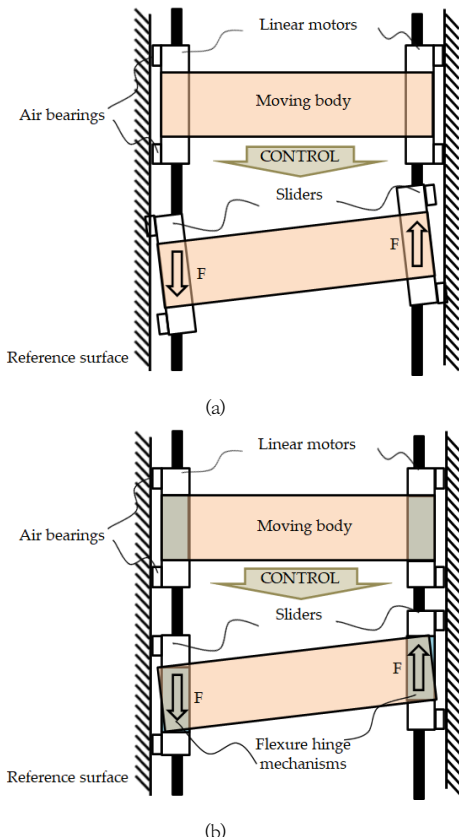


Fig. 2. Gantry control of the air bearing guided stage  
(a) Conventional structure without a compliant mechanism (b) New structure with compliant mechanisms.

요 모션 오차는 Y축과 평행하게 놓인 한 쌍의 레이저 간섭계를 사용하여 실시간 측정이 가능하며 이미 널리

알려진 갠트리 제어로 보상 할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 공기 베어링의 강성 저하 또는, 심한 경우 기능 고장으로 이어질 수 있다. Y축 방향으로 힘을 내는 두 선형 모터를 병렬로 제어하여 요 모션 오차를 보정하면 Fig. 2와 같이 공기베어링과 기준면 사이의 간격이 달라지며 공기베어링 표면에 손상이 발생한다.

공기베어링에 대한 손상 위험 없이 요 모션 오차를 보상하려면 기구부의 요 모션 방향 자유도가 필요하다. 따라서 회전 모션을 허용하는 유연기구부 크로스립과 Y-슬라이더 사이에 삽입되었다. 일반 회전 베어링이 사용될 수도 있으나, 마찰에 의한 정밀도 영향을 고려하여 유연 기구부 사용되었다.

## 2.3 리플의 발생

선형 모터에 의해 주로 유발되는 세 가지 종류의 힘 리플이 있다 [12]. 이 중 코깅 리플은 자석과 철심 사이의 인력에 의해 발생하여, 다른 유형의 리플에 비해 가장 크다. 본 논문에서 사용한 선형모터는 철심이 없는 공심형 모터로서 코깅 리플이 나타나지 않는다. 상호 리플은 주 기성을 띄는 영구자석에 의한 자속밀도와 3상 코일에 인가되는 전류의 하모닉 불일치로 인해 발생한다. 이러한 상호 리플은 선형 모터의 코일을 통해 흐르는 전류에 비례하여 그 크기가 나타난다. 마지막은 일반적으로 그 크기가 작아서 무시할 수 있는 자기저항 리플이다.

상호 리플은 전류에 비례하여 나타나므로, 공기베어링 스테이지의 정속 구동 시에는 거의 나타나지 않는다. 공기베어링 및 선형 모터 모두 비접촉 구조이므로 마찰에 의한 힘도 발생하지 않고, 운동 방향으로 강성이 0에 가까워 기구부의 정속 운동 시에 힘이 인가되지 않기 때문이다. 즉 선형 모터의 입력 전류가 0에 가까워 상호 리플도 거의 나타나지 않는다. 그러나 갠트리 제어를 수행하는 경우 요 운동 방향의 강성은 0이 아닌 값을 갖는다. 모든 정속 구간에서 요 모션 오차가 발생하고, 이를 보상하기 위해서 선형모터는 추력을 인가해야 하기 때문이다. 즉 요 모션 오차를 보상하기 위한 갠트리 제어는 모터에서 0이 아닌 전류를 출력한다.

## 2.4 리플 모델링

3상 1세트의 선형 모터 코일에 의한 상호 리플은 Choi et al. [13]에 의해 Eq. (1)과 같이 수학적으로 모델링되었다.

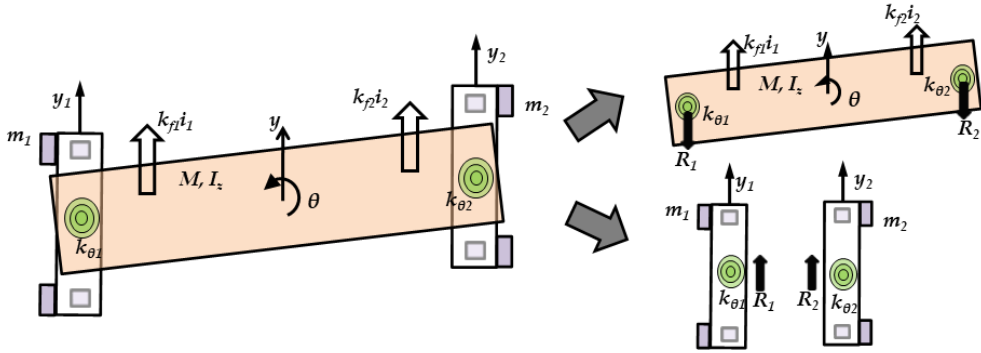


Fig. 3. A free body diagram of the air bearing stage with compliant mechanisms.

$$F = [I_a \ I_b \ I_c] [B_a \ B_b \ B_c] \quad (1)$$

$$= \frac{I}{2} \left\{ \begin{array}{l} (1+2k)B_1 \\ + (1-k)(B_1+B_3)\cos(2\theta) \\ + (1-k)(B_3+B_5)\cos(4\theta) \\ + (1+2k)B_5\cos(6\theta) \\ + L \end{array} \right\}$$

$F$ 는 선형 모터에 의해 생성된 힘,  $L$ 는 전류,  $B$ 는 자속 밀도,  $\theta$ 는 위치,  $k$ 는 자속 밀도의 불확실성 계수이다. DC 성분에 해당하는 리니어 모터의 작동력은 전류에 비해하고 스테이지 위치와는 무관하다. 그러나 상호 리플의 원인인 고차항은 전류에 비해하며 위치와 함께 주기적인 특성도 보인다. 특히 2차 및 6차 항이 다른 항보다 큰 것으로 알려져 있다 [13]. 스테이지의 동적 모델은 Fig. 3. 과 같이 자유물체도에서 얻을 수 있다. 요 모션을 하는 크로스빔에 대한 지배 방정식은 Eq. (2)와 같이 얻을 수 있으며, 각 변수는 Table 1.에 표기한다.

$$M\ddot{p} = -kp + k_f i + f_{ripple}(i, p) \quad (2)$$

Table 1. The parameters of the governing equation of stage

Position vector	$p = [y \ \theta]^T$
Current Vector	$i = [i_1 \ i_2]^T$
Stiffness	$k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta 1} + k_{\theta 2} \end{bmatrix}$
Force constant	$k_f = \begin{bmatrix} k_{f1} & 0 \\ 0 & k_{f2} \end{bmatrix}$
Inertia	$M = \begin{bmatrix} M + m_1 + m_2 & m_1 l_1 + m_2 l_2 \\ -m_1 l_1 + m_2 l_2 & I_z + m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 \end{bmatrix}$
Force ripple	$f_{ripple}(i, p) = \begin{bmatrix} f_{r1}(i_1, i_2, y, \theta) \\ f_{r2}(i_1, i_2, y, \theta) \end{bmatrix}$

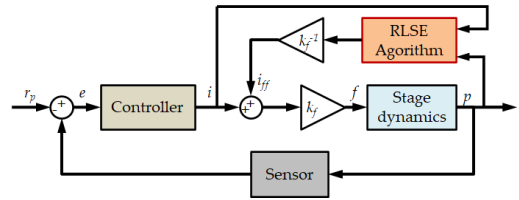


Fig. 4. Algorithm for compensation of mutual ripple.

Eq. (2)에서 확인할 수 있듯이 유연기구가 없는 경우에는 강성  $k$ 가 0이므로 정속 구간에서는 좌변의 관성력, 우변의 첫 번째 항인 유연기구에 의한 복원력이 0이 되고 이에 따라 모터 전류 및 모터 전류에 비해하는 구동력과 힘 리플이 모두 0이 된다. 하지만 유연기구의 도입으로 인해 Z축 회전 방향의 강성인  $k$ 가 수식에 포함된다. 이로 인해 정속 구간에서 관성력이 없더라도 유연기구의 강성을 극복하기 위한 전류로 인해 선형모터에서 추력이 발생하고, 이와 더불어 상호 리플에 의한 힘리플이 발생한다.

## 2.5 리플 보상 알고리즘

상호 리플을 보상하기 위한 개념적 알고리즘은 Fig. 4.에 나와 있으며 PID 컨트롤러를 사용한다. 동시에 상호 리플을 추정하고, 그 추정값을 앞먹임한다. 상호 리플을 추정하는 첫 번째 방법은 스테이지 모델을 기반으로 룩업 테이블을 만들어 사용하는 것이다. Eq. (2)에 따르면 스테이지의 모델에 기반하여 현재의 입력 전류와 스테이지의 위치로부터 상호 리플을 추정할 수 있다. 두 번째 방법은 제어 시스템이 RLSE(Recursive Least-Square Estimator) 알고리즘 [14]을 사용하여 실시간으로 상호 리플을 적응 학습하도록 하는 것이다. 알고리즘은 복잡하지만 모델링되지 않은 반복적인 불확실성을 보상할 수 있다.

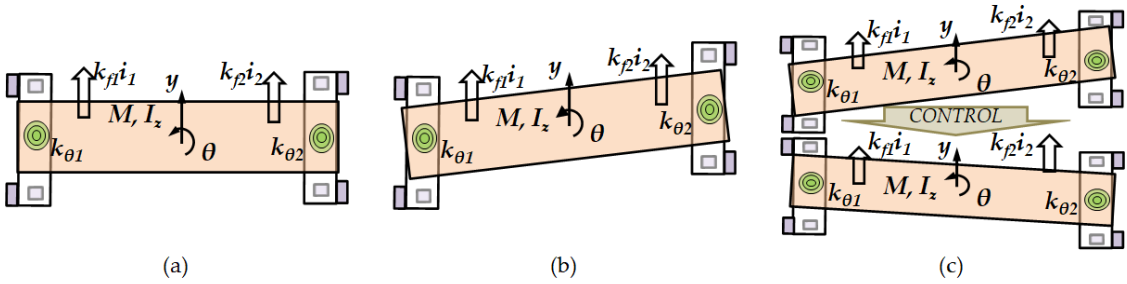


Fig. 5. Three different state of the air bearing stage for simulation of yaw motion error compensation, (a) case 1: Ideal case of zero yaw motion error, (b) case 2: 45 arcsec of initial orientation, (c) case 3: 45 arcsec of initial orientation and yaw motion error of -20 arcsec during constant speed operation.

### 2.6 시뮬레이션

두 가지 방식의 리플 추정 알고리즘을 MATLAB simulink를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 두 선형 모터 중 하나는 1 A의 전류 인가 시 약 1.7 N의 힘리플을 갖고, 다른 하나는 1 A의 전류 인가 시 약 2.4 N의 힘리플을 갖도록 설정하였다. 모터의 최대 구동력은 66 N으로 힘리플의 정도는 약 2.6~3.6%에 해당한다. 리플의 보상 없이 PID 제어만을 수행하는 경우와 두 가지의 상호 리플 추정 방식을 사용하여 보상 제어하는 경우에 대해서 15 arcsec의 요 모션 오차 발생 시 20 mm/s 정속 구동 제어 결과를 Table 2.에 나타내었다.

리플 보상 알고리즘을 적용하면 속도 리플이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 적응 제어의 경우 보상하지 않는 경우에 비해서 속도 리플이 약 22 % 수준이다. 록업 테이블 및 적응제어의 두 가지 보상 방법은 비슷한 결과를 보이지만 록업 테이블 방법은 실용성이 떨어진다. 모든 동작 환경, 속도, 초기 향, XY 스테이지의 현재 위치 등에 대한 록업 테이블을 만드는 것은 현실적으로 불가능하기 때문이다. 따라서 RLSE를 이용한 적응 학습 방법이 더 유용하다 볼 수 있다.

Table 2. Simulation results

Compensation algorithm	Velocity ripple
PID	$\pm 0.140 \%$
PID + Look-up table	$\pm 0.039 \%$
PID + Adaptive learning	$\pm 0.031 \%$

다음은 H형 공기베어링 스테이지의 세 가지 다른 요 모션 오차 발생 상황에서 상호 리플을 보상 제어하는 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내었다. Fig. 5(a).는 크로스빔이 Y축 방향으로 이동하는 과정에서 요 모션 오차가

전혀 없는 경우이다. 크로스빔과 Y-슬라이더 간에 상대 회전 변위가 전혀 없는 경우로서, 제작 및 조립 오차가 전혀 없고 기구부와 모든 공기 베어링의 가이드 기준면 또한 이상적으로 평행하면서 동시에 이상적으로 편평한 경우를 가정한 시뮬레이션 사례이다. 따라서 정속 구동 시에는 두 선형 모터의 입력 전류가 이상적으로 0이다. Fig. 5(b).는 크로스빔과 Y-슬라이더의  $\theta_z$  방향 초기 각 변위가 45 arcsec 인 경우이다. 이는 위치 되먹임 센서로 사용하는 레이저 간섭계를 고려한 것으로 최대 정렬 오차 90 arcsec의 절반 정도를 초기 구성 요 모션 오차로 가정하였다. 이러한 오차는 크로스빔의 조립이나 레이저 간섭계의 설치 과정 등에서 발생할 수 있다. Fig. 5(c).에서는 크로스빔의 초기  $\theta_z$  방향 초기 각변위가 45 arcsec이고, Y축 방향으로 이동하는 동안 약 -20 arcsec의 요 모션 오차가 추가적으로 발생하는 시뮬레이션 사례이다. 이는 크로스빔의 Y축 방향 이동 중 상부의 X-슬라이더가 X축 방향으로 이동하면서, 레이저 간섭계로부터의 빔이 반사되는 평면거울의 편평도 공차에 의해 발생할 수 있는 요 모션 오차를 가정한 것이다.

Fig. 6.은 이상적인 경우의 결과이다. 변위 리플, 속도 리플, 정속 구간에서 두 선형 모터의 전류 모두 0인 것을 볼 수 있다. 반면 Fig. 7.에서는 2.2 N의 힘 리플이 발생하고 유연기구의 복원력에 저항하는  $\pm 1.35$  A의 전류가 각각의 선형 모터에서 출력되어, 요 방향 초기 향을 유지하면서 요 모션 오차가 발생하지 않도록 제어되는 것을 볼 수 있다. 속도 리플은  $\pm 0.036$  mm/s로서 정속 20mm/s의 0.18 % 수준이며 변위 리플은 1.35  $\mu$ m이다. Fig. 8.에서 최대 힘 리플은 약 1.2 N이고 유도되는 최대 전류는 약  $\pm 0.8$  A이다. 초기 상태에서 20 arcsec의 요 모션 오차가 발생함에 따라 모터의 입력전류도 변화하며 정속 구간에서도 선형 모터의 입력 전류가 변화

하는 것을 볼 수 있다. 보상된 속도 리플은 0.053 % 수준으로  $\pm 0.0105$  mm/s이며, 변위 리플은  $0.42 \mu\text{m}$ 이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 요 모션 오차를 갠트리 제어로 실시간으로 보상하는 XY 스테이지에 대하여, 고정밀도를 위한 공기베어링 사용 시 유연기구 적용을 소개하고, 그에 따라 발생하는 선형 모터의 상호 리플 효과를 연구하고 보상 시뮬레이션을 수행하였다. 공심형 선형모터와 무마찰 공기베어링을 사용하는 스테이지에서 처음으로 상호 리플의 영향을 분석하였으며, 요 모션 오차 보상을 위한 유연기구의 도입으로 그 영향이 나타나는 것을 보였다. 본 연구 결과의 의의를 정리하면 다음과 같다.

1. H형 XY 스테이지의 갠트리 제어 시 정밀도 저하 원인이 되는 힘리플을 분석하고, 무마찰 공기베어링 가이드와 선형모터 구성에서도 정속 구동 시에 발생할 수 있는 상호 리플의 발생을 분석하였다.
2. 유연힌지가 적용된 공기베어링 스테이지의 요 모션 오차 보상 제어와 연계한 정류 리플의 보상 방법을 제안하였다.
3. 요 모션 오차를 보상하며 정속 구동 제어 시, 정류 리플을 보상할 경우 속도 리플이 20 % 수준으로 저감되는 것을 확인하였다.
4. 정류 리플을 보상하기 위해 실용성이 높은 학습 적응 제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 리플 저감 성능을 확인하였다.

본 연구 결과는 갠트리 제어뿐만 아니라 요 모션 오차를 보상하기 위한 일반적인 XY 스테이지의 경우에도 확장 적용할 수 있다. 향후 유연기구를 장착한 공기베어링 스테이지를 제작하고, 실제 시스템에 적응 제어 알고리즘을 적용하는 실험 연구를 수행할 계획이다.

### References

[1] W. Gao, Y. Arai, A. Shibuya, S. Kiyono, C. H. Park, "Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage", *Precision Engineering*, Vol.30, No.1, pp.96-103, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2005.06.003>

[2] S. K. Ro, S. Kim, Y. Kwak, C. H. Park, "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>

[3] S. K. Ro, J. K. Park, "A compact ultra-precision air

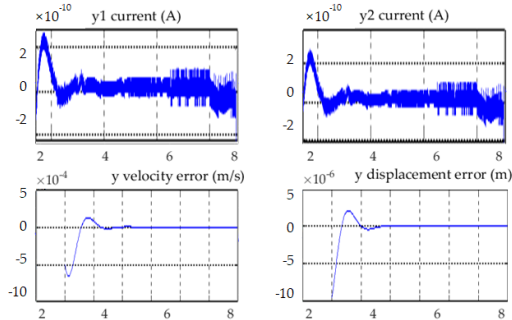


Fig. 6. Yaw motion error compensation control results of case 1: Ideal case of zero yaw motion error.

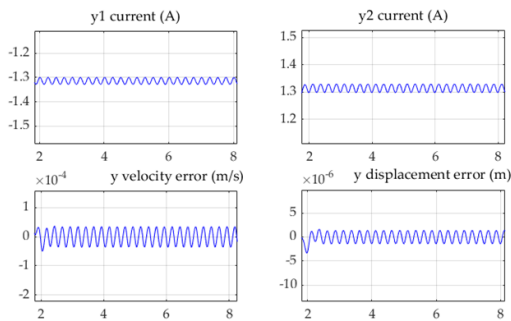


Fig. 7. Yaw motion error compensation control results of case 2: 45 arcsec of initial orientation.

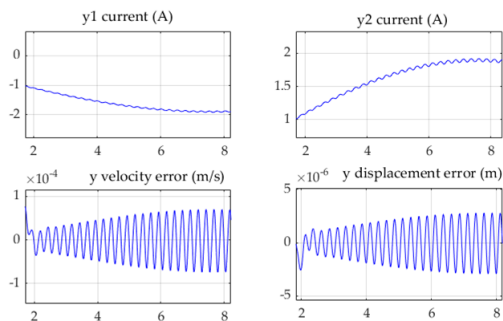


Fig. 8. Yaw motion error compensation control results of case 3: 45 arcsec of initial orientation and yaw motion error of -20 arcsec during constant speed operation.



- bearing stage with 3-DOF planar motions using electromagnetic motors”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.12, pp. 115-119, 2011.  
<https://doi.org/10.1007/s12541-011-0014-y>
- [4] T. Kondo, S. Fujisawa, N. Kitade, "XY Table using a Linear Electromagnetic Actuator," U.S. Patent 5 760 500, Jun. 2, 1998.
- [5] W. T. Novak, "Dual Guide Beam Stage Mechanism with Yaw Control," U.S. Patent 5 760 564, Jun. 2, 1998.
- [6] K. K. Tan, S. Y. Lim, S. Huang, H. F. Dou, T. S. Giam. "Coordinated motion control of moving gantry stages for precision applications based on an observer-augmented composite controller", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.12, No.6, pp.984-991, 2004.  
<https://doi.org/10.1109/TCST.2004.833608>
- [7] M. E. Lee, "Window Frame-Guided Stage Mechanism," U.S. Patent 5 874 820, Feb. 1999.
- [8] S. Sakino, E. Osanai, "Motion Guiding Device," U.S. Patent 5 228 358, Jul. 1993.
- [9] C. S. Teo, K. K. Tan, S. Y. Lim, S. Huang, E. B. Tay, "Dynamic modeling and adaptive control of a H-type gantry stage," *Mechatronics*, Vol. 17, No. 7, pp. 361-367, 2007.  
<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2007.04.004>
- [10] K. K. Tan, T. H. Lee, S. Huang, Precision Motion Control - Design and Implementation, p.272, Springer-Verlag London, 2008.  
<http://doi.org/10.1007/978-1-84800-021-6>
- [11] D. Ahn, H. Kim, D. G. Gweon, S. H. Lee, W. Choi. et al., "Design of Flexure Hinge Mechanism for Dynamic Yaw Control of FPD Lithography Stage", *Proceedings of ASPE 2010 Annual Meeting*, American Society for Precision Engineering, Atlanta, USA, pp.223-225, October, 2010.
- [12] K. C. Kim, J. J. Kim, Y. M. Choi, "Design of a Hybrid Controller to Eliminate the force Ripple in the Linear Motor", *Journal of the semiconductor & display equipment technology*, Vol.7, No.1, pp.17-22, 2008.
- [13] Y. M. Choi, D. G. Gweon, M. G. Lee, "Adaptive Force Ripple Compensation and Precision Tracking Control of High Precision Linear Motor System", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No.12, pp.55-60, 2005.
- [14] G. Y. Cho, *A Study on Position Adaptive Control of Linear Brushless Motor*, Master's thesis, Hanyang Univ, Seoul, Korea, 1995.

안 다 훈(Dahoon Ahn)

[정회원]



- 2013년 8월 : 한국과학기술원 기계항공시스템학부 (공학박사)
- 2014년 4월 ~ 2019년 2월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2019년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 조교수

<관심분야>

초정밀시스템 설계, 에너지 하베스팅, 철도차량 부품

이 학 준(Hakjun Lee)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 2019년 7월 : 삼성 전자 생산기술연구소 책임연구원
- 2019년 8월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 지능형생산시스템연구부 문 선임연구원

<관심분야>

정밀시스템 설계, 제어