Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:3 (2018) 194~202

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.194

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

위치 결정 시스템의 안정성 개선을 위한 와전류 감쇠기(Eddy Current Damper) 설계와 응용

조재훈[a], 서창훈[b], 김효영[a], 전용호[b], 이문구[b*]

Design and Application of an Eddy-Current Damper for Improving Stability in Positioning Systems

Jae-Hoon Jo[a], Chang-Hoon Seo[b], Hyo-Young Kim[a], Yong-Ho Jeon[b], Moon-Gu Lee[b*]

[a] *Research Institute of Sustainable Manufacturing System, Korea Institute of Industrial Technology, 89, Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31056, Korea*
[b] *Mechanical Engineering, Ajou University, 206, Worldcup-ro Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 11 April 2018
Accepted 30 May 2018

Keywords:
Eddy Current Damper
Vibration Suppression
1-Axis System
Linear Motion
Air-bearing System

ABSTRACT

Air bearing-guided linear motion modules have so little friction that they are widely used for precision positioning systems. The module exhibits disturbance vibration that is difficult to control because the air bearings have too small a damping coefficient. In this paper, an eddy-current damper (ECD) is proposed for an air bearing-guided linear motion module to improve the vibration isolation characteristics. A Halbach magnet array is devised to increase the density of the magnetic flux of the ECD because a stronger magnetic field generates a greater damping force. A theoretical magnetic model of a Halbach magnet array is presented, and its working principle is investigated. In order to investigate the performance of the module, an experimental instrument with the module, ECD, and control devices was constructed. The authors compared the experimental data of the module's positioning performance for the cases with and without the ECD.

1. 서 론

최근 웨어러블 디바이스, 대면적 디스플레이 등 차세대 전자 부품의 수요 증가로 인해 전자 부품의 고밀도/고집적화가 지속적으로 이루어지고 있다. 이에 대응하기 위해 제조 기술의 고정밀화는 필수 요소이다. 이러한 고정밀화를 위한 장비에 초정밀 스테이지와 같은 위치 결정 시스템 또한 보다 높은 정밀도가 요구되고 있다. 장비에 적용되는 선형 모션 매커니즘 중에서 공기 베어링(Air Bearing)은 비접촉 특성을 가지고 있어서 마찰이 거의 없어서 기존의 LM 가이드에 비해서 미소 변위 제어가 용이하고, 높은 대역폭을 가진다.

그러나 반대급부로 감쇠 특성이 좋지 않아 미세진동, 전자기 노이즈 등 외란에 취약하여 이를 억제하기 위한 방안이 필요하다[1]. 마찰 또는 유체 점성을 이용한 기존의 감쇠기는 감쇠특성이 상대적으로 좋은데, 이 특성을 비접촉 상태에서 구현하기 위하여 와전류 감쇠기(Eddy Current Damper, ECD)를 연구한 사례들이 있다. R. C. Ellis 등은 회전 모터의 회전자와 별도로 고정된 구리 합금 디스크 사이의 와전류를 이용해 감쇠력을 발생시키는 매커니즘을 제안

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2338
Fax: +82-31-219-1611
E-mail address: moongulee@ajou.ac.kr (Moon Gu Lee).

하였다[2]. H. A. Sodano 등은 자유 진동하는 캔틸레버 빔에 도체판을 부착하고 외부의 자석을 이에 접근시켜 와전류를 생성함으로써 감쇠진동을 유도하는 방법을 제안하였다[3]. B. Ebrahimi 등은 원통형의 자석과 도체 실린더를 이용하여 축방향의 감쇠력을 제공하는 와전류 감쇠기를 제안하였다[4].

와전류 감쇠기는 마찰을 이용한 감쇠기와 달리 비접촉 특성을 가지므로 반영구적인 사용이 가능하고, 오일 댐퍼 등의 점성 감쇠기와 달리 클린룸, 진공 챔버 등의 민감한 환경에서도 적용이 가능하여 이를 정밀 스테이지에 적용하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다.

Y. Zhang 등은 할바흐 자석배열(Halbach Magnet Array)을 통해 극대화된 자기력으로 구동되는 평면스테이지의 위치 제어 시 불안정성을 개선하기 위하여 와전류감쇠기를 적용하는 방법을 제시하였다[5]. K. K. Tan 등은 제진과 방진을 동시에 수행하기 위하여 선형 이송장치의 고정자와 이동자 간에 감쇠력을 발생시키는 와전류 감쇠 장치를 제안하였다[6]. 숭실대학교 안형준 교수팀은 리니어 모터의 반발력에 의한 미세진동을 억제하기 위한 보상장치에서 마그넷 트랙에 발생하는 진동을 억제하기 위하여 자석 배열 사이에 도체판을 추가하는 방식의 와전류 감쇠기를 고안하였다[7].

본 논문에서는 단위 부피 대비 와전류 감쇠 효과를 극대화하기 위해 할바흐 자석 배열과 도체 뒤편에 강자성체를 적용한 와전류 감쇠기를 제안한다. 그리고 이를 선형의 위치 결정 시스템에 적용하여 감쇠 성능의 향상을 확인하고자 한다. 첫 단계로, 본 논문에서 제안하는 할바프 자석 배열의 이론 모델을 살펴보고, 이 자석배열이 큰 자속밀도를 제공하고 따라서 ECD의 큰 감쇠력을 발생함을 확인한다. 두 번째 단계로, 공기베어링과 선형모터로 구성된 선형 모션 모듈에 ECD를 적용한 프로토타입을 제작한다. 이후 실험을 통해 와전류 감쇠기의 효과를 검증함과 동시에, 이론 모델의 감쇠비와 실험 모델의 감쇠비를 비교하여 이론모델과 실제 실험 모델 간의 유사성을 확인하고 이론 모델에 대한 타당성을 확보하고자 한다.

2. 와전류 감쇠 이론 및 모델링

2.1 와전류 감쇠 이론

와전류(Eddy current)란 솔레노이드 코일 혹은 영구자석 등의 자기장 안에서 움직이는 도체에 일어나는 현상이다. Fig. 1을 보면, 영구 자석이 만드는 자기장 안에서 받는 도체가 움직이면 자기장 영향에 의해 도체에서는 소용돌이치는 와전류가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이 와전류와 영구자석이 상호작용을 하면 자기력이 발생하는데 이 자기력은 영구자석이나 도체의 움직임을 방해한다.

생성된 와전류로 인해 도체의 움직임을 방해하는 힘은 운동에너지를 소산시키는데 와전류 감쇠(Eddy current damping) 현상이라 한다. 여기서 도체에 유도되는 전류밀도($\vec{J}$)에 관한 식은 (1)과

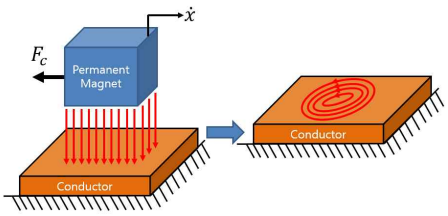


Fig. 1 Principle of eddy current

같이 나타낼 수 있으며, 유도 전류는 도체 면에 수직 방향인 자기장 세기와 속도에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$\vec{J} = \sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \tag{1}$$

유도된 와전류로 발생하는 감쇠 힘의 수식은 식 (2)와 같이 나타난다[7]. 와전류 감쇠 힘은 형상계수(α), 도체의 전기전도율(σ), 자기장의 영향을 받는 도체의 단면적(S), 도체의 두께(t), 자속 밀도(Magnetic Flux Density,B) 도체 판의 속도($\vec{v_x} = \dot{x}\vec{i}$)에 영향을 받는다[8,9]. 식 (2)와 같이 감쇠 힘은 자속 밀도의 제곱에 비례한다.

$$F = \alpha\sigma S B^2 \vec{v_x} t \tag{2}$$

본 논문에서는 자속 밀도 증가를 통해 와전류 감쇠 효과를 향상시키는 방안을 제시하며 이를 이론적으로 모델화 할 것이다. 자속밀도의 수식은 (3)과 같이 매질의 투자율(μ)과 자기장 세기(Magnetic Field Strength, H)에 비례한다.

$$B = \mu H \tag{3}$$

자속 밀도에 영향을 주는 자기장 세기는 자석 표면으로부터 거리가 멀어질수록 점점 약해진다. 거리에 따른 자기장 세기 약화 현상을 최소화하기 위해 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 와전류가 발생하는 도체(Conductor) 뒤편에 강자성체(Back-Iron)를 배치하고, 자석을 할바흐 배열로 배치하는 개념을 고안하였다.

강자성체는 Fig. 3과 같이 도체에 영향을 주는 자기장이 분산되는 것을 최소화시키며 자속 밀도를 향상시키는 역할을 한다. 따라서 자속 밀도가 향상되어 단위 면적당 와전류 감쇠 힘을 극대화 할 수 있다. 이러한 강자성체가 활용된 자속 밀도의 이론 모델은 Fig. 4에서 보여주는 Image method를 활용하여 모사가 가능하다[10]. 수식 (4)는 진공 혹은 공기 중에 오직 하나의 영구자석만이 존재할 때

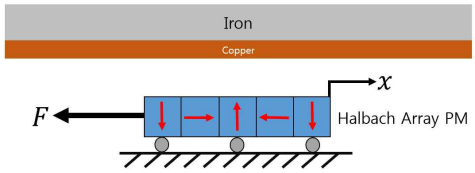


Fig. 2 Conceptual model of eddy current damper (ECD)

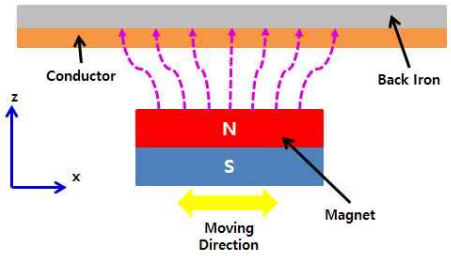


Fig. 3 Permanent magnet with backing iron for ECD model

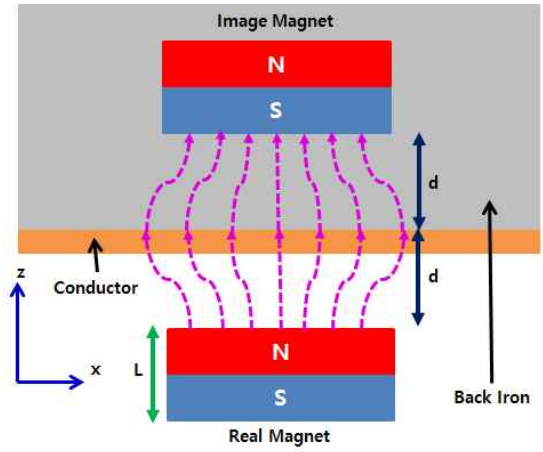


Fig. 4 Permanent magnet and its image for ECD model

z-방향의 임의위치에서의 자속밀도이다.

$$B_{single\,magnet}(z) = \frac{2\mu_0 M}{\pi}\left[\tan^{-1}\left(\frac{(z+L)\sqrt{a^2+b^2+(z+L)^2}}{ab}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{z\sqrt{a^2+b^2+z^2}}{ab}\right)\right] \quad (4)$$

2.2 할바흐(Halbach) 배열 자석 모델

수식 (4)에서 하나의 자석에 대한 자속밀도 값을 구할 수 있다. 그러나, 와전류 감쇠 힘을 구하려면 실제 할바흐 배열안의 각 자석에 의한 자속밀도를 중첩하여 전체 자속밀도를 구해야 한다. 이를 위하여 수식 (4)의 자화(Magnetization), M은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다. 이는 여기서 Mxn은 x-방향으로 자화된 자석의 구형파적 변화이며, Mzn은 z-방향으로 자화된 자석의 구형파적 변화이다. 또한, γ_n은 한 주기의 할바흐 자석 배열의 공간 파수 (wave number, 2πn/L)이다. 이는 Fig. 2나 Fig. 6의 자석배열이 x방향으로 무한히 반복되어 있다는 가정에서 구한 것이다.

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} M_{xn}\sin(\gamma_n x) \\ \sum_{n=1}^{\infty} M_{zn}\cos(\gamma_n x) \end{bmatrix} \quad (5)$$

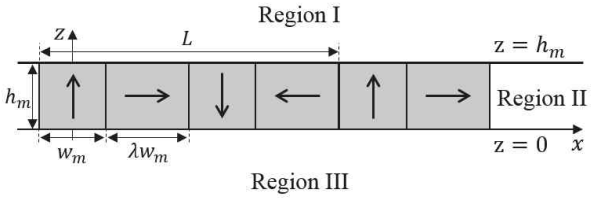


Fig. 5 Magnetic field modeling of Halbach permanent magnet array[12]

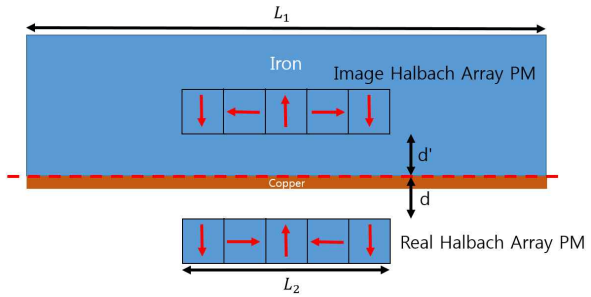


Fig. 6 Halbach magnet array model and image method

상기 수식 (5)를 수식 (4)에 대입하면 Fig. 5와 같이 공기 중에 있는 무한 길이의 할바흐 자석배열의 자속밀도를 구할 수 있다[12].

수식 (6)과 같이 Image 자석의 영향을 합치면 Fig. 2 혹은 Fig. 6과 같이 강자성체와 할바흐 자석배열이 있는 상황에 대한 자속밀도를 계산할 수 있다. 이 역시 무한한 길이의 자석배열을 가정한 것이다.

$$B(z) = B_{single\,magnet}(z) + B_{single\,magnet}(z-2d) \quad (6)$$

앞서 구한 자속밀도는 할바흐 배열이 무한하며 도체의 길이도 무한하다는 가정에서 구한 것이다. 이와 달리 본 연구의 이론 모델은 Fig. 6과 같이 도체판의 길이(L_1)에 비해 할바흐 자석 배열의 길이(L_2)가 짧다. 따라서 기존 이론 모델 수식에 도체 길이와 자석 길이 비에 비례하도록 수식을 수정할 것이다. 실제 상황에서는 길이에 비례하지 않고 길이의 제곱 혹은 세제곱의 역수에 비례할 것이라고 생각된다. 이러한 비선형적인 항은 수정항 k에 반영하였다.

이 방식은 정확한 모델링은 아니지만 경향을 확인할 수 있다는 것에 의의가 있다. 이를 정리하면, 이론 모델의 자속 밀도(B_{ECD})는 수식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{ECD} = k\frac{L_2}{L_1}B(z) \quad (7)$$

도출된 수식 (7)은 강자성체와 할바흐 자석 배열이 적용된 자속밀도의 수식을 나타낸 것이다. 모델의 자속 밀도 값 B_{ECD}는 수식 (2)에 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{ECD} = \alpha\sigma S B_{ECD}^2 \overrightarrow{v_x} d \quad (8)$$

식 (8)은 이후 제작된 실험 기구의 특성 값, 치수를 대입하여 이

론 결과를 산출한 뒤 실험 결과와 비교하여 이론 모델의 타당성을 검증할 것이다.

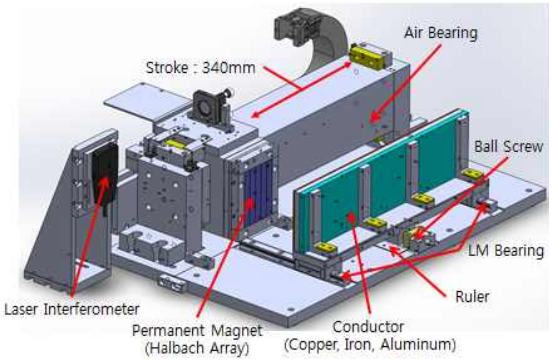
3. 와전류 감쇠기를 갖는 위치 결정 모듈의 설계

3.1 실험 기구 설계

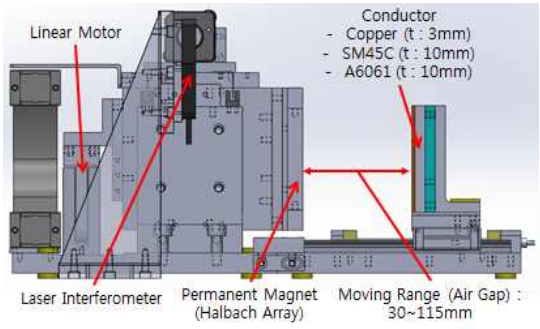
선형 모터와 공기 베어링으로 구성된 위치 결정 모듈에서 와전류 감쇠기의 적용했을 때와 미적용했을 때에 대한 진동 감쇠 효과를 확인하기 위해 Fig. 7과 같은 실험 기구를 설계 및 제작하였다.

실험 기구를 구성하는 주요 부품들의 상세 사양은 Table 1에 나타내었다. 공기베어링(S40-03100-100406 : New way 社)을 구동하기 위해 선형 모터(JTKL-G3610 : Justek 社)로 1축 운동을 구현한다. 움직임 감지와 제어를 위해서 레이저 간섭계(RLE10 : Renishaw 社)를 구동부 베이스와 별개로 설치한다. 레이저 간섭계의 레이저는 이동자(Mover)에 부착한 거울로 반사될 수 있도록 하였다.

이동자에는 와전류 감쇠 효과를 만들기 위해 각 잔류 자석밀도(Br) 1.45 T, 크기 14×15×100 mm^3의 네오디뮴(N48M) 재질 영구 자석을 5개의 할바흐 배열로 정렬하여 부착 하였다. 이동자가 움직이는 모든 구간에서 와전류 감쇠 효과가 발생할 수 있도록 순서대로 넓이 10^5×415 mm^2 크기의 구리(Copper, t=3 mm), 철(SM45C, t=10 mm)을 도체 판으로 사용하였고 이를 알루미늄(AL6061, t=10 mm) 판 위에 고정하였다.



(a) 3D-View



(b) Side View

Fig. 7 Configuration of positioning module with ECD

영구 자석과 도체 판 사이는 와전류 감쇠 효과를 적용하거나 미적용 할 수 있도록 LM Guide 위에 도체 판을 고정하였다. 이를 통해 도체 판은 공기 베어링 구동 방향과 수직으로 움직이게 하였다. 또한 볼스크류를 LM Guide 와 나란히 설치하여 자석과 도체 판의 간극 조절을 용이하게 하였다. 영구 자석과 도체 판의 간격인 ECD의 공극(Air Gap) 간격은 최소 거리 7 mm, 최대 거리는 133 mm 로 움직임이 가능하며 LM Guide가 설치된 베이스에 철제 자를 부착하여 공극 거리를 측정할 수 있게 하였다. 또한 도체판과 베이스, 베이스와 기구가 고정/부착되는 광학 브레드보드 사이에는 실험 시 발생 가능한 와전류의 누전을 막기 위한 절연체(아크릴, 유리섬유)를 삽입하였다.

설계한 실험 기구를 제작한 모습은 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 그리고 실험 기구를 제어 기기들과 연결한 모습 및 개략도는 Fig. 9와 같다.

3.2 실험 기구의 제어

실험 기구의 선형 모터를 구동하기 위해 Amp (TA330: Texas Instrument社)와 선형 모터를 연결하였으며, 전원 공급을 위해 Power Supply (E3640a: Keysight Technologies社) 2개를 Amp에 연결하였다.

시스템 제어에 필요한 제어기는 DS1005 (dSPACE社)를 활용하였다. 실험 시스템의 제어 블록 선도는 Fig. 10에서 보여주는 것처럼 나타낼 수 있다. Matlab 기반인 Simulink를 이용하여 제어 로직을 구성하였으며 제어기법은 PID (proportional-integral-derivative) 제어를 사용하였다.

제어의 흐름은 입력 신호(Digital Signal)를 입력하면 이를 dSPACE 컨트롤러가 신호로 수신하여 전압 신호(V)로 변경 후 출

Table 1 Specifications of System Modules

Part No.	Spec.
S40-03100-100406 (Air bearing)	x,y Axis Accuracy: 0.01 um/mm
SSR20_XW1_M (LM Guide)	x,y Axis Accuracy: 6 um/200 mm
BSST_0802 (Ball Screw)	Static load: 3.2 kN, Dynamic load: 1.8 kN
JTKL3610 (Linear Motor)	Continuous Power:260 W
ATMAX40H (Neodymium Magnet)	Magnetic Density: 1.45 T
RLE10 (Laser Interferometer)	Resolution: 39.5~316 nm
TA330 (Amp)	Maximum Current: 18 A
E3640a (Power Supply)	Maximum Voltage: 20 V
DS1005 (Controller Board)	Maximum Input Frequency: 1 GHz

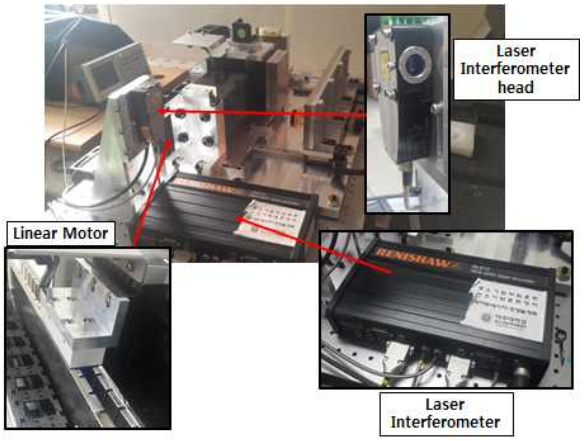


Fig. 8 Main components of positioning module

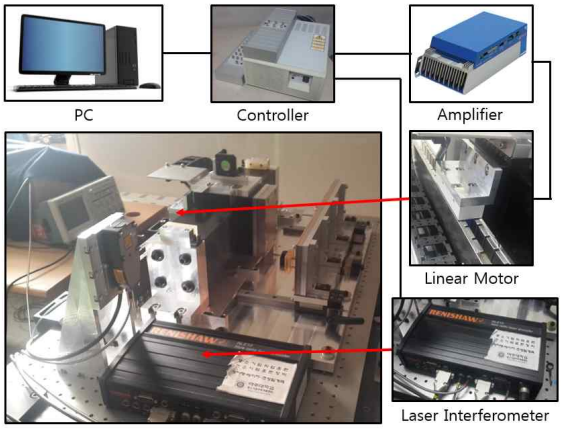


Fig. 9 Experiment system setup of positioning module with ECD

력한다. 출력 전압을 TA330 앰프가 수신하여 선형 모터에 맞은 120° 위상차의 3상(3-Phase) 전류 형태로 변환한다. 이렇게 변환된 전류가 선형 모터에 가해지면 구동 힘이 출력되고 이것이 가속도로 생성된다. 가속도는 시스템 모델인 전달함수 G의 영향을 받아 이동자의 변위를 출력한다.

이 때 생성된 속도가 와전류 감쇠기의 감쇠 힘을 발생시킨다. 감쇠기로 발생된 힘은 다시 선형 모터의 출력 힘에 영향을 준다. 마지막으로, 출력 변위 정보를 레이저 간섭계가 신호로 변환하여 다시 컨트롤러에 피드백 해 준다.

4. 실험 결과

4.1 실험 방법

앞서 언급하였듯 실험 기구의 구성은 선형 모터와 공기 베어링 기반 구조로, 레이저 간섭계(Laser Interferometer)를 이용하여 제어한다. 실험 기구를 활용하여 와전류 감쇠기 적용하거나 미적용 하였을 때 정지 상태 진동 데이터와 스텝 입력 시 목표 지점으로 수렴하는 위치 데이터를 확인한다. 도출 데이터를 활용하여 감쇠 계수를 계산하고, 실험 결과와 이론 결과의 감쇠 계수를 비교하여 이론 모델의 타당성을 검증한다. 와전류 감쇠기 적용에 따른 진동 감쇠 효과를 확인하여 위치 정밀도 향상을 확인한다. 결론적으로 본 연구 결과를 통해 와전류 감쇠기에 대한 감쇠 효과를 확인하고, 이론 모델 검증을 통해 최적화 방향을 제시할 수 있다.

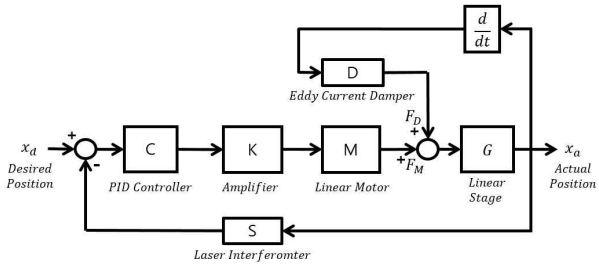


Fig. 10 Block diagram of positioning system with ECD

먼저 와전류 감쇠 적용하거나 미적용 하는 상태에서 8초간 정지 시 진동을 레이저 간섭계 데이터로 측정 및 분석하였다. 그리고 와전류 감쇠 적용/미적용 상태에서 변위 100 mm의 스텝 입력에 대한 위치 수렴 실험을 진행하였으며 이 때 위치 수렴까지의 시간과 변위 데이터를 측정하였다. 신호를 입력한 시간을 기준으로 안정화 지점까지의 시간을 측정하여 안정화 시간을 측정하였고, 안정화 중의 변위 데이터로부터 감쇠 계수를 계산하였다. 추가로 스텝 입력 실험과 동일한 방식으로 와전류 감쇠기와 자석 간의 거리(공극)를 변화시키면서 변위 수렴 데이터를 측정하였다. 이로부터 공극 변화에 따른 감쇠 계수의 변화 추세를 확인하였다.

최종적으로 실험 결과로부터 감쇠기의 효과를 확인하였을 뿐 아니라 이론 모델 결과와 실험 결과를 비교하여 이론 모델의 타당성을 검증하였다.

4.2 정지 위치 안정도(In-Position Stability) 실험

ECD 미적용 실험과 적용 실험 모두 8초 간 정지 상태의 진동을 측정하였다. ECD를 적용하였을 경우의 자석과 도체 판 간의 간격은 7 mm로 설정하였다.

ECD를 적용하지 않았을 경우 최대 704 nm, 평균 175 nm의 진동이 발생하였으며 RMS값은 217 nm로 측정되었다. ECD를 적용하였을 경우 최대 404 nm, 평균 87 nm의 진동이 발생하였으며 RMS (root mean square) 값은 110.6 nm으로 측정되었다. 이에 대한 그래프는 Fig. 11과 같다. 또한, 결과를 Table 2에 요약하였다.

각 진동의 성분을 확인하기 위해 주파수 분석을 실시하였으며

이에 대한 그래프는 Fig. 12와 같다. 주파수 그래프로부터 와전류 감쇠기가 낮은 주파수 영역대의 진동 감쇠에 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

4.3 스텝 입력에 대한 반응(Step Response) 실험

본 실험은 PID제어를 활용하여 구동을 실시하였으며, 효과적인 감쇠 계수 도출을 위해 각 이득(Gain)값을 시스템이 발산하지 않는 선에서 최대한 단순하게 설정하였다. 해당 시스템에 적용한 비례이득 (P-gain)은 2, I이득과 D이득은 0로 설정하여 실험을 진행하였다.

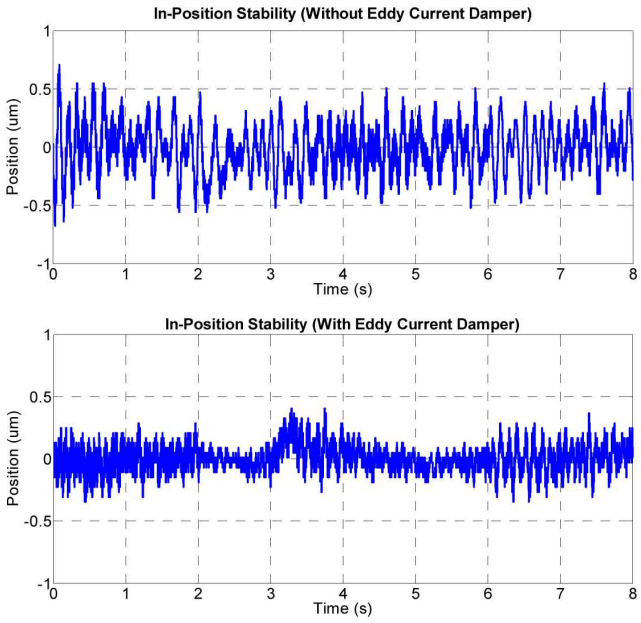


Fig. 11 In-positing stability of positioning module without ECD (upper) and with ECD (lower)

Table 2 In-position stability of positioning system with and without ECD

	Without Eddy Current Damper	With Eddy Current Damper
Average Vibration (μm)	0.175	0.087
Maximum Vibration (μm)	0.704	0.404
RMS (μm)	0.217	0.111

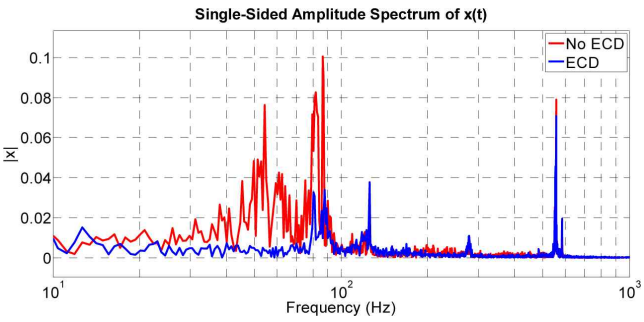


Fig. 12 FFT (fast Fourier transform) result of experiment in-position sensor output

와전류 감쇠기를 적용하지 않은 실험에서 입력 신호가 발생한 시간은 2초이며 변위 수렴 지점의 시간은 6초이다. 따라서 안정화 시간은 4초가 걸렸다. 와전류 감쇠기를 적용한 실험에서 도체 판과 할바흐 배열 자석 사이의 거리는 20 mm로 설정하였다. 입력 신호가 발생한 시간은 2초 이며 위치 수렴 지점의 시간은 4.3초 이다. 따라서 안정화 시간은 2.3초가 걸렸다.

두 실험 결과를 비교하였을 때, 와전류 감쇠기가 적용되었을 경우가 적용되지 않았을 경우에 비해 안정화 시간이 1.7초(42.5%) 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

4.4 실험 결과의 와전류 감쇠 계수

수렴 진동에 대한 감쇠를 측정하기 위한 관련 수식은 다음과 같다. 수식 (9) 의 x_1, x_2 값은 Fig. 13에 표시와 같이 첫 번째 최고점과 두 번째 최고점의 값에서 위치 명령 값을 뺀 것을 의미한다. 해당 값은 Table 3과 같다. 여기서 x_1과 x_2의 값은 Fig. 13과 14의 데이터를 활용하였다. 활용한 데이터는 Table 3에 나타내었다.

$$\delta = \ln\frac{x_1}{x_2} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{9}$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2+\delta^2}} \tag{10}$$

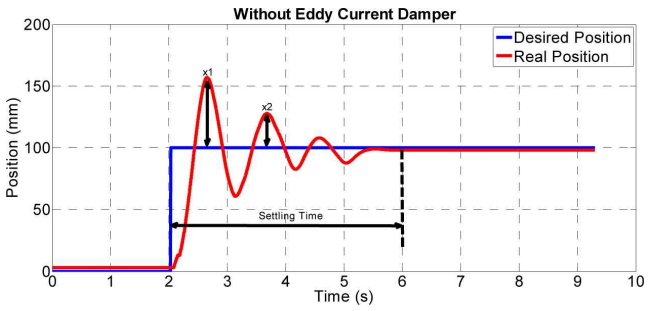


Fig. 13 Step response without ECD air gap = 20 mm)

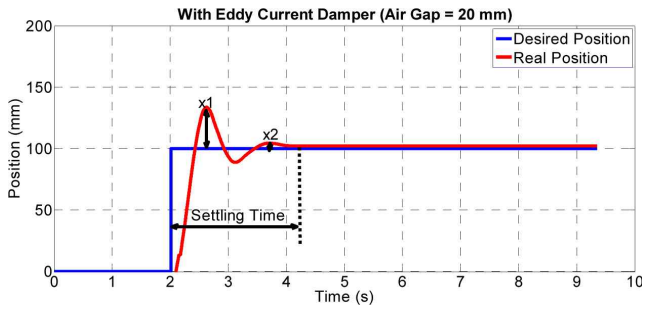


Fig. 14 Step response with using ECD air gap = 20 mm)

Table 3. Parameters to calculate damping coefficients

	x_1	x_2	ζ
Without Eddy Current Damper	0.057	0.028	0.114
With Eddy Current Damper	0.034	0.004	0.310

Table 4 Experiment results of damping coefficients

Damping Coefficient without Eddy Current Damper (C_{No-ECD})	Damping Coefficient with Eddy Current Damper (C_{ECD})
0.762	2.072

위의 데이터를 활용하여 수식 (9), (10) 에 적용하여 구한 결과 ζ 의 값은 각각 0.122, 0.268이 도출된다. 이를 활용한 부족 감쇠(under-damped)에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \tag{11}$$

$$x(t) = Ce^{-\zeta\omega_n t}\cos(\omega_n t - \phi) \tag{12}$$

본 논문의 실험에서 나타난 감쇠의 종류는 부족감쇠이다. 따라서 해당 수식의 해는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mk}} \tag{13}$$

사용된 공기 베어링 이동자 질량은 측정 결과 5.6 kg 이었다. 실험 시스템의 강성 k값은 공기베어링을 기반으로 하고 있어 자체 강성은 없으나 PID 제어의 이득 값에 따라 강성을 지니게 된다. 앞서 언급하였듯 이득 값은 P이득만 2를 입력하였기에 시스템 자체 강성 값 k는 2로 가정할 수 있다. 가정한 k값과 실험으로부터 도출한 값을 대입하여 감쇠 계수 C를 도출하면 Table 4와 같다.

4.5 공극 변화에 따른 감쇠 계수 변화

와전류 감쇠기에서 공극 거리가 멀어질수록 자기장 세기가 약해지고 자기장 세기가 약해지면 감쇠 계수도 작아진다. 이러한 공극 거리에 따른 감쇠 계수의 추세를 확인하기 위해 실험을 실시하였다. 공극 거리 20 mm부터 3mm 단위로 점차적으로 증가시키며 29 mm까지의 위치 수렴 데이터를 측정한다. 측정된 실험 결과는 앞서 계산한 방식으로 감쇠 계수를 도출한다. 공극의 변화에 따른 위치 수렴 결과 그래프는 Fig. 15이며, 실험으로부터 도출한 감쇠 계수는 Table 5와 같다.

실험 결과 공극 거리가 증가할수록 와전류 감쇠 계수가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이로서 공극이 감쇠 계수 C에 미치는 영향 및 추세를 확인할 수 있었으며, 실험 결과와 이론 모델의 결과를 비교하여 이론 모델의 타당성을 입증할 것이다.

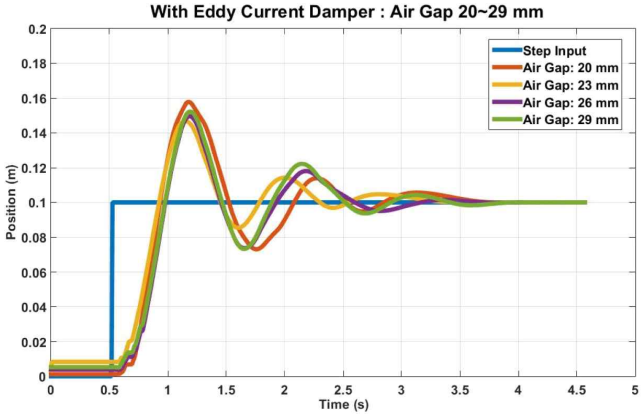


Fig. 15 Step response with using ECD

Table 5 Damping for various air gap

Air Gap (mm)	20	23	26	29	Without ECD
x_1 (m)	0.034	0.042	0.048	0.050	0.057
x_2 (m)	0.004	0.009	0.016	0.020	0.028
ζ	0.310	0.232	0.169	0.145	0.114
C	2.072	1.552	1.120	0.971	0.762

4.6 이론 모델과 실험 결과의 비교

MCK(Spring-Mass-Damper) 시스템의 수식으로 표현하면 감쇠 힘과 관련된 식 (2)에서 속도 성분인 $\overrightarrow{v_x}$를 제외한 나머지 항은 감쇠계수 C로 치환할 수 있다. 따라서 이를 감쇠계수 C에 대한 식으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \alpha\sigma SB^2 d \tag{14}$$

2장에서 설명한 이론 모델 수식을 이용, 실험에 사용된 각 부품의 성능 값을 대입하여 각 항의 값을 구하면 Table 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 각 항들의 값을 모두 식 (14)에 대입하여 도출한 이론 모델의 감쇠 계수와 실험 결과의 감쇠계수 C값을 Table 7과 같다. 감쇠기를 적용하지 않았을 경우는 공기 베어링 특성 상 이론적으로 자체 감쇠 특성이 0 에 수렴하게 된다. 따라서 해당 경우를 제외한 나머지 실험 결과와 각각에 해당하는 이론 모델 결과 값을 비교하였다.

공극 거리의 증가에 따른 이론 모델과 실험의 결과 값을 비교하

Table 6 Parameters of ECD

α (Shape Factor)	0.375
σ (Conductivity of Conductor)	5.96×10^7 ℧/mp
S (Area of Conductor)	4.358×10^{-2} m^2
B (Magnet Flux Density)	2.733×10^{-7} A/m
d (Thickness of Conductor)	3×10^{-3} m

Table 7 Damping coefficient of theory and experiment

Air Gap (mm)	20	23	26	29	Without ECD
C_{exp}	2.07	1.55	1.13	0.971	0.762
C_{theory}	1.38	0.941	0.639	0.439	-

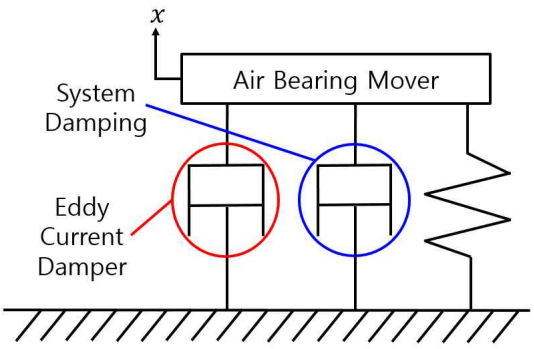


Fig. 16 Simple modeling of positioning system

면 어느 정도의 오차가 발생한다. 하지만 공극 거리가 증가함에 따라 감소되는 감쇠 계수의 추세는 비슷한 것을 확인할 수 있다.

이러한 오차가 발생하는 이유는 실험기구 자체 특성으로 인한 감쇠 계수가 존재하기 때문이라 예측하였다. 실험 시스템의 감쇠 구조는 공기 베어링의 감쇠 계수 $C_{airbearing}$와 와전류 감쇠기의 감쇠 계수 C_{ECD}로 구성되어 있다. 실험 시스템은 공기 베어링의 감쇠와 와전류 감쇠기의 감쇠 중 감쇠 효과가 높은 와전류 감쇠기의 감쇠계수 C_{ECD}의 영향에 더 많은 영향을 받는다. 이는 스프링-댐퍼 구조로 표현할 시, 직렬연결 구조가 아니라 Fig. 16과 같이 병렬연결의 스프링-댐퍼 구조의 거동과 비슷한 거동을 보여준다. 따라서 이론 감쇠 계수와 비교하기 위한 보정 감쇠 계수는 (15)과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{theory} + C_{without\ ECD} = C_{calibrated} \tag{15}$$

(13)의 수식과 같이 이론 모델로 도출한 감쇠 계수 값에 와전류 감쇠기를 적용하지 않았을 경우 도출된 감쇠 계수로 보정하였다. 보정된 감쇠 계수 값과 이론 감쇠 계수 값은 Table 8과 같이 나타나며 실험, 이론모델, 보정된 이론값을 그래프로 비교해보면 Fig. 17과 같은 형상을 보여준다.

수정된 이론 감쇠계수 값과 실험 감쇠계수 값의 비교 결과, 변화 추세뿐만 아니라 감쇠 계수 결과 또한 이론과 실험이 근접한 값을 보이는 걸 알 수 있다. 이를 통해 수정된 이론 모델이 실제 실험 모델과 근접한 거동을 보인다고 할 수 있으며 향후 모델 최적화 방향 제시에 도움이 될 것이라 예측된다.

그러나 이러한 고찰은 수식 (7)의 비선형 수정항 k를 1로 고려한 것이다. 실제 이 값은 ECD의 형상, 설계, 제작에 따라 매우 비성형

Table 8 Damping coefficient from theory and experiment

Air Gap (mm)	20	23	26	29
$C_{Calibrated}$	1.31	0.790	0.368	0.209
C_{exp}	2.07	1.55	1.13	0.971

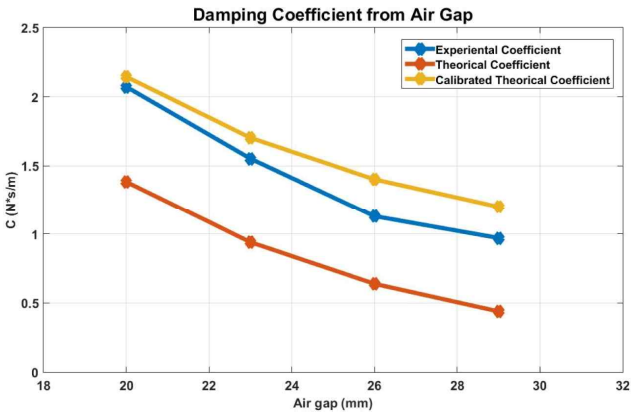


Fig. 17 Variation of damping coefficient with and without ECD - after calibration

적이고 복잡한 양상을 띨 것이다. 그러므로 이러한 이론적인 추정은 매우 제한적인 것을 밝혀둔다.

5. 결론 및 고찰

본 논문은 ECD를 적용하여 공기 베어링의 진동 감쇠 효과 성능 향상에 대한 연구를 실시하였다. 이를 확인하기 위해 개략 모델을 지정하고 이에 대한 이론 모델을 수립하였다. 또한 해당 모델의 검증을 위해 실험 기구를 설계 제작하여 실험을 실시하였다. 실험 기구의 구조는 공기 베어링과 선형 모터를 기반으로 한 1축 위치결정 모듈이다. 해당 시스템의 와전류 감쇠기는 할바흐 배열 자석, 구리판, 강자성체를 적용하여 와전류 효과를 극대화하였다.

실험 결과로부터 와전류 감쇠기를 적용하지 않았을 경우에 비해 와전류 감쇠를 적용하였을 때 적은 잔류 진동을 확인할 수 있었다. 또한 안정화 시간의 단축을 확인하였다. 추가로 와전류 감쇠기의 공극 거리를 변화시키며 변위 입력 실험을 실시하였다. 해당 실험으로부터 공극 변화에 따른 감쇠 계수의 변화 추세를 확인하였다. 실험 결과로부터 도출한 감쇠 계수 변화와 이론 모델의 감쇠 계수 변화를 비교하여 이론 모델의 경향성을 확인할 수 있었다.

결론적으로 와전류 감쇠기가 시스템 위치 안정성 향상에 효과가 있다는 것을 검증하였다. 추가로 이론 모델을 수립, 실험 결과와의 대조를 통해 모델의 경향이 타탕함을 확인하였다. 따라서 이론 모델을 이용한 시스템의 최적화를 기대할 수 있게 되었다.

향후 연구 방향으로, 이론 모델에서 고려되지 못한 비선형 수정

항과 기타 오차 요소를 정리하여 최적화 향상을 해야 할 것이다. 그리고 와전류 감쇠기로 인해 구동력 손실이 발생하게 된다. 이를 최소화하는 개선 안에 대한 추가 연구가 필요할 것이라 판단된다.

와전류 감쇠기를 적용하면 공기 베어링과 선형 모터 기반의 위치 결정 모듈의 감쇠 성능이 향상된다. 감쇠 성능 향상에 따라 위치 결정 시스템은 위치 정밀도가 향상되고 고가감속이 가능해진다. 위치 정밀도가 높은 위치 결정 시스템을 반도체나 디스플레이 생산 라인 등에 적용된다면 공정 내의 정밀도가 향상될 것이라 기대된다. 이로써 고부가가치의 초정밀 제품 생산을 기대할 수 있을 뿐 아니라 제품의 불량률 또한 감소할 수 있을 것이라 예상된다. 또한 고가감속의 시스템으로부터 공정 시간을 단축할 수 있을 것이다. 이는 시제품 제작 시간 단축으로 제품의 연구 개발에 도움이 될 것이며 생산성 향상에도 도움이 될 것이다. 이러한 효과로부터 관련 산업에서 제품 생산 경쟁력에 도움이 될 것으로 기대한다.

References

[1] You, T. H., Jung, S. C., Lee, J. E., Choi, H. G., Ji, H. K., Kim, H., 2007, A Study on The Dynamic Characteristics of the Porous Air Bearing with Moving Velocity Change, Korean Society for Noise and Vibration Engineering(KSNVE), 11 48-52.

[2] Ellis, R. C., Fink, R. A., Rich, R. W., 1989, Eddy Current Damper, In NASA, Marshall Space Flight Center, The 23rd Aerospace Mechanisms Symposium, 127-137.

[3] Sodano, H. A., Bae, J. S., Inman, D. J., Belvin, W. K., 2005, Concept and Model of Eddy Current Damper for Vibration Suppression of a Beam, Journal of Sound and Vibration, 288:4 1177-1196.

[4] Ebrahimi, B., Khamesee, M. B., Golnaraghi, F., 2010, Permanent Magnet Configuration in Design of an Eddy Current Damper, Int. Microsystem Technoligies, 16 19-24.

[5] Yi, Z., Hong, Z., Sun, H. Z., 2010, Research of the Orthoscopic Permanent Magnet Eddy Current Damper in Magnetic Stage, IEEE, International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM), 14 354~356.

[6] Tan, K. K., Huang, S. N., Teo, C. S., Yang, R., 2010, Damping Estimation and Control of a Contactless Brake System Using an Eddy Current, IEEE, ICCA 2010, Xiamen, 2224-2228.

[7] You, Y. H., Pham, M. N., Ahn, H. J., Choi, D. S., Cho, K. J., 2012, Optimal Design of Reaction Force Compensation Device for Precision Stage Considering Eddy Current Damper, Korean Society for Precision Engineering, 2012:5, 1095-1096.

[8] Lee, K. J., Park, K. H., 1999, Optimal Robust Control of a Contactless Brake System Using an Eddy Current, Mechatronics, 9:6, 615-631.

[9] Bae, J. S., Kwak, M. K., Inman, D. J., 2005, Vibration Suppression of a Cantilever Beam Using Eddy Current Damper, Journal of Sound and Vibration 284 805-824.

[10] Furlani, E. P., 2001, Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analysis, and Applications, Academic Press, NewYork.

[11] Park, J. S., Kwag, D. G., Bae, J. S., Hwang, J. H., 2008, A Study on Modeling and Experiments of an Eddy Current Damping Korean Society for Noise and Vibration Engineering (KSNVE), 2008:4 240-244.

[12] Zhu, H., Teo, T. J., Pang, C. K., 2015, Analysis of Force Harmonics and Eddy Current Damping for 2 DOF Moving Magnet Linear Motor, IECON, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1055-1060.