

와전류감쇠의 모델링 및 특성 실험에 관한 연구

A study on Modeling and Experiments of an Eddy Current Damping

박정삼[†]·곽동기*·배재성**황재혁***

Jung-Sam Park[†], Dong-Gi Kwag*, Jae-Sung Bae** and Jai-Hyuk Hwang***

Key Words : Eddy current(와전류), Magnetic Flux Density(자기장 세기), Damping Coefficient(댐핑계수)

ABSTRACT

Eddy currents are induced when a nonmagnetic conductive material is moving subjected to the magnetic field due to a permanent magnet. These currents circulates in the conductive material and are dissipated, causing a repulsive force between the magnet and the conductor. Using this concept, the eddy current damping can be used as a viscous damping. The present study investigates the characteristics of a magnetic damping analytically and experimentally. The theoretical model of a eddy current damping is developed from electromagnetics and is verified from experiments. The drop test of a magnet in the cooper tube shows that the present model can accurately predict the damping force. Additionally, the dynamic test of a eddy current damping is carried to verify the present model.

1. 서 론

스마트 구조물(smart structures)을 위한 진동제어기(vibration controller)의 설계에 있어서 효율적인 작동기의 개발에 많은 노력들이 이루어져 왔다. PZT, terenol-D, ER, MR, SMA 와 같은 스마트 재료들은 그러한 작동기의 후보로써 연구되어져 왔다. 이러한 작동기에 추가적으로 자석과 전도체 사이의 상대적 운동에 의해 전자기력(electro-magnetic force)이 발생하고 이 힘은 감쇠력으로 사용할 수 있음이 알려져 왔다. Fig. 1은 와전류(eddy current)에 의해 발생하는 감쇠력의 원리를 보여준다. 와전류가 발생하게 되면, 와전류의 순환에 의해 작용하고 있는 자기장과 극성이 반대인 자기장이 발생하게 되고, 이로 인해 반발력(repulsive force)이 발생하게 된다[1-4]. 그러나 전도체의 전기저항(electrical resistance)에 의해 유도전류는 열로 사라지게 되며, 반발력도 사라지게 된다. 동적 시스템(dynamic system)의 경우는 움직이는 전도체가 자

기장내에 있게 되면 기전력(electromotive force, emf)이 발생하게 되고, 유도전류를 다시 발생시켜 전도체의 속도에 비례하는 반발력을 발생시킨다. 이 전류는 소산되기 때문에 없어지게 된다. 따라서, 자석과 전도체는 점성 감쇠기와 같은 역할을 하게 된다.

본 연구에서는 와전류 감쇠이론을 바탕으로 와전류 감쇠기를 설계하기 위한 수학적 모델링을 수립하고, 실험을 통하여 수학적 모델링의 타당성을 검증하였다.

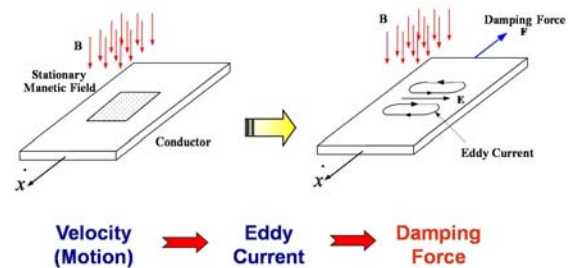


Fig. 1 Damping force due to eddy current

2. 원형 실린더 내의 와전류 감쇠이론

2.1 영구자석 모델링

영구자석에 의한 자기장내에서 움직이는 전도체에 유도되는 전류밀도 \vec{j} 는 표면전하를 무시할 경우 다음과

† 박정삼, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원
* 정희원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원
** 정희원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부
연락처, E-mail : jsbae@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1
*** 정희원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 $\vec{v} \times \vec{B}$ 는 전류밀도 \vec{J} 를 유도하는 기전력이며, 식(1)에서 유도전류는 속도와 자기장의 수직성분 값에 비례함을 알 수 있다. 영구자석 주위의 자기장의 세기를 구하기 위하여 Fig. 2와 같은 원통좌표계를 사용하였다. 자석이 놓인 방향을 Z축으로 가정하고 공간상의 한점 $P(R, \phi, z)$ 을 정한다.

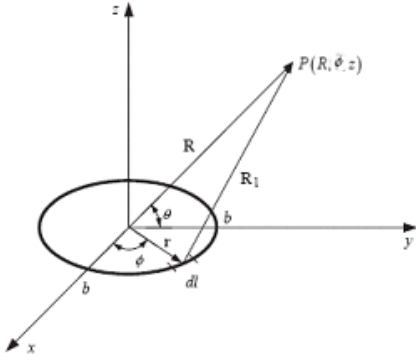


Fig. 2 Schematic of the circular magnetized strip

Bio-savart Law을 적용하면 자기장세기는 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 M_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{R}_1}{R_1^2} \quad (2)$$

여기서 μ_0 는 자유공간의 투자율, M_0 는 단위 길이당 자화, \hat{R}_1 는 단위벡터를 나타낸다. 또한 \vec{R}_1 은 원형루프에서 작용점까지의 거리를 의미하며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{R}_1 = \vec{R} - \vec{r} \quad (3)$$

여기서 $\vec{R} = ya_y + za_z$, $\vec{r} = b\cos\phi a_x + b\sin\phi a_y$ 이다. 식(2)에서의 미소구간 $d\vec{l}$ 은 다음과 같다.

$$d\vec{l} = -b\sin\phi d\phi a_x + b\cos\phi d\phi a_y \quad (4)$$

따라서 자기장의 세기는

$$B_y(y, z) = \frac{\mu_0 M_0 b z}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin\phi}{(b^2 + y^2 + z^2 - 2by\sin\phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi$$

$$= \frac{\mu_0 M_0 b z}{4\pi} I_1(b, y, z) \quad (5)$$

$$B_z(y, z) = \frac{\mu_0 M_0 b}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{b - y\sin\phi}{(b^2 + y^2 + z^2 - 2by\sin\phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi$$

$$= \frac{\mu_0 M_0 b}{4\pi} I_2(b, y, z) \quad (6)$$

이다.

여기서 B_y, B_z 는 각각 y 방향과 z 방향의 자기장의 세기를 나타내며, Δz 를 자석길이상의 한점이라고 하면 식 (5), (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_y(y, z, \Delta z) = \frac{\mu_0 M_0 b}{4\pi} \int_{-h}^0 (z - \Delta z) I_1(b, y, z - \Delta z) d\Delta z \quad (7)$$

$$B_z(y, z, \Delta z) = \frac{\mu_0 M_0 b}{4\pi} \int_{-h}^0 I_2(b, y, z - \Delta z) d\Delta z \quad (8)$$

따라서 P 점에서의 전체 자기장의 세기는 다음과 같다.

$$\vec{B} = \vec{B}_y(y, z, \Delta z) + \vec{B}_z(y, z, \Delta z) \quad (9)$$

자성체내에서 자석의 운동과 함께 주위의 자속의 변화를 일으키게 되고 이러한 자속의 변화는 Eddy current을 생성시키고, eddy current에 의해 자석의 운동하는 방향과 역방향으로 damping force가 생기게 되고 그 표현식은 다음과 같다.

$$\vec{F}_d = \int_V (\vec{J} \times \vec{B}) dV \quad (dV = \rho dp d\phi dz) \quad (10)$$

만약 속도의 방향이 Z 방향이라고 가정 한다면, 속도의 방향과 B_z 의 방향과 일치하게 되어 cross product의 값이 0이 되므로 여기서는 B_y 만 고려해주면 된다. 따라서 식(10)은

$$\vec{F}_{d1} = v \int_V \sigma B_y^2(y, z) dV \quad (-\vec{a}_z) \quad (11)$$

이다. 여기서 $k_d = \sigma \int_V B_y^2 dV$ 은 댐핑계수(damping coefficient)라 정의를 할 수 있다.

2.2 2개의 영구자석 모델링

모델링을 위하여 Fig. 3과 같이 같은 극이 서로 마주보게 한다.

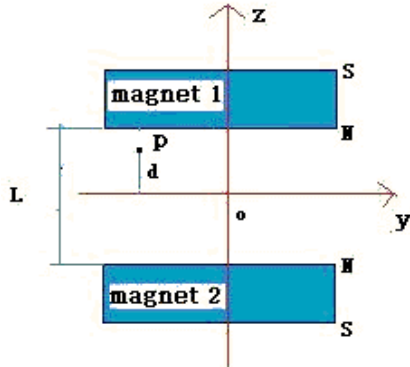


Fig. 3 Modeling two magnet

자석이 두 개인 경우 Fig. 2에서의 P점에서의 y방향의 자기장의 세기는 두 자석에 의해 생긴 자기장의 합과 같게 되는데 B'_y 라고 정의하면 Damping Force는 다음과 같다.

$$\vec{F}_{d2} = v \int_V \sigma B_y'^2(y, z, d, L) dV \quad (-\vec{a}_z) \quad (12)$$

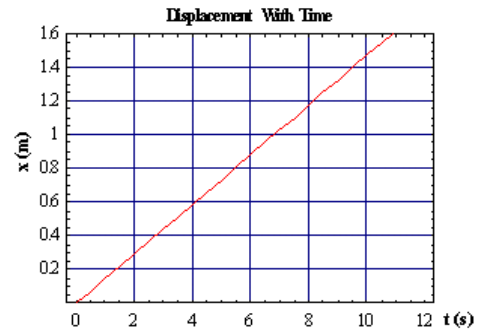
3. 자석의 자유낙하운동

전도성이 좋은 구리 실린더를 이용하여 자유낙하운동을 실험하였다. Table 1은 실험조건을 나타낸다.

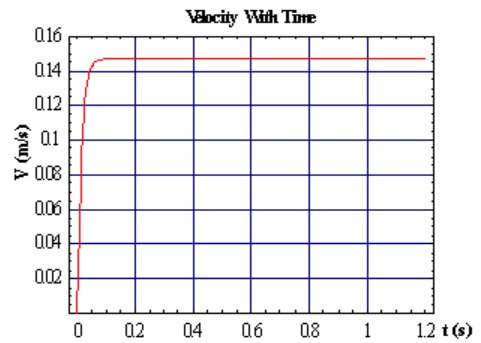
Table 1 Parameter for dropping experiment

Properties	Value
Magnet Mass	23g
Magnet size	20 × 10mm
Copper Length	110mm
Copper external diameter	12.5mm
Copper inside diameter	11.5mm
Copper thickness	1.0mm

두 개의 케이스로 구분하여 자석의 자유낙하 실험을 실시하였다. 첫 번째 실험 결과 Fig. 4는 한 개의 자석을 자유낙하 실험, 두 번째 실험 결과 Fig. 5는 같은 극 방향의 일정한 거리를 유지하는 두 개의 자석 자유낙하 실험을 수행하였다.

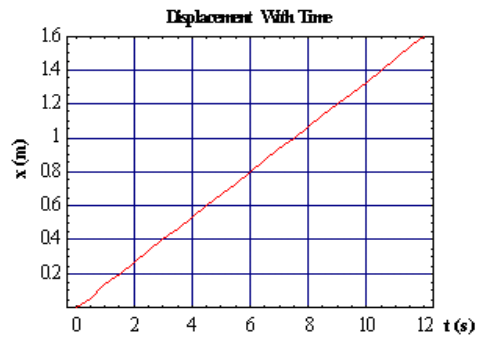


(a) Displacement

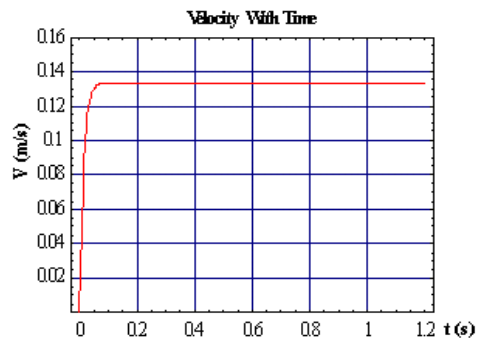


(b) Velocity

Fig. 4 Motion of one falling magnet



(a) Displacement



(b) Velocity

Fig. 5 Motion of two falling magnets

Table 2 Comparison between prediction and experiment

	Present	Experiment	Damping force	Gravity
One Magnet	7.48s	7.94s	0.211N	0.225N
Two Magnet	8.26s	8.73s	0.471N	0.463N

이론치와 실험치의 차이는 자석이 자유낙하 시 표면 마찰력에 의한 차이로 해석된다. Damping force는 식 (11), (12)을 이용하여 계산하였다.

4. 와전류 감쇠기의 동특성 실험

와전류 감쇠기의 동특성 실험을 하기 위한 시스템 구성은 Fig. 6과 같다.

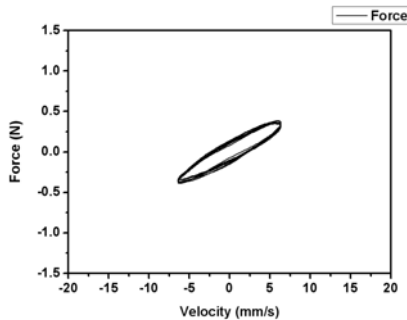


Fig. 6 Schematic of experiment system

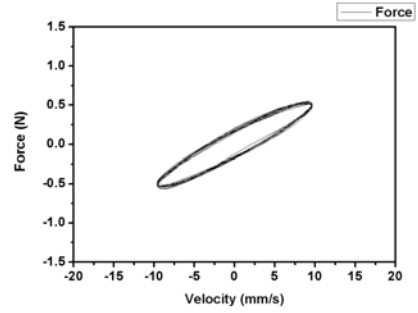
Eddy current damper에 가해진 가진력은 다음과 같다.

$$x(t) = A \sin(2\pi f_n t) \quad (13)$$

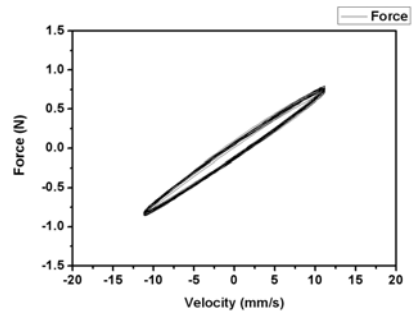
식 (13)에서 $A=0.2, 0.3mm$ $f_n = 5, 9Hz$ 에 대해 실험을 실시하였다.



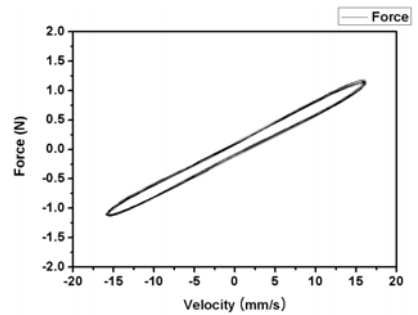
(a) $A = 0.2mm$ $f_n = 5Hz$



(b) $A = 0.3mm$ $f_n = 5Hz$



(c) $A = 0.2mm$ $f_n = 9Hz$



(d) $A = 0.3mm$ $f_n = 9Hz$

Fig. 7 Force-Velocity hysteresis loop

와전류 감쇠이론에 의하면 force-velocity의 그래프는 이력현상이 나타나지는 않지만, Fig. 7의 결과는 이력현상이 나타난다. 이는 마찰력과 같은 해석모델에서 고려되지 않은 힘들 존재하기 때문이다. Fig. 7에서 이력곡선의 기울기는 댐핑계수를 의미하고 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Damping coefficient of eddy current damper

Parameter	Damping coefficient
$A = 0.2mm$ $f_n = 5Hz$	52.8 kg/s
$A = 0.3mm$ $f_n = 5Hz$	52.7 kg/s
$A = 0.2mm$ $f_n = 9Hz$	70.8 kg/s
$A = 0.3mm$ $f_n = 9Hz$	70.6 kg/s

앞의 수학적 모델링을 이용한 예측된 댐핑계수는 51.02 kg/s 이다. 5Hz의 경우는 예측치와 잘 일치하고 있으나, 9Hz의 경우는 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구의 모델에서 고려하지 않은 동적특성에 의한 결과로 판단된다. 실험결과에 의하면 같은 주파수 영역의 댐핑 계수의 비슷한 결과를 얻을 수 있으나, 주파수에 따라 그 값이 다를 수 있다. 따라서, 와전류 감쇠의 동적 특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 영구자석이 전도체 튜브 내에서 운동을 한다면, 전도체 튜브와 영구자석간의 상대운동으로 인해 와전류 감쇠가 발생하는 원리를 소개하였다. 와전류 감쇠는 기존의 다른 감쇠 방법과 달리 적용이 매우 간단하고, 감쇠를 위한 외부로부터 에너지가 필요하지 않고, 영구자석과 전도체의 간단한 적용에 의해 매우 큰 감쇠효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 와전류에 의한 감쇠효과개념을 수학적 으로 접근하여, 수학적 방정식을 도출하였으며, 실험을 통하여 수식의 타당성을 확인하였다. 본 연구의 감쇠모델은 정상상태의 경우에는 감쇠를 정확하게 예측하나, 동적인 경우는 실험결과와 약간의 차이를 보인다. 따라서, 와전류 감쇠의 동적 특성의 모델링에 대한 추가적인 노력이 있어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Bae, J.S., Kwak, M.K., and Inman, D.J., "Vibration Suppression of Cantilever Beam Using Eddy Current Damper", Journal of Sound and Vibration, Vol. 284, 2005, pp. 805-824.
- (2) Sodano, H.A., Bae, J.S., Inman, D.J., and Belvin, W.K., "Concept and Model of Eddy Current Damper for Vibration Suppression of a Beam," Journal of Sound and Vibration, Vol. 288, 2005, pp. 1177-1196.
- (3) Sodano, H.A., Bae, J.S., Inman, D.J., and Belvin, W.K., "Improved Concept and Model of Eddy Current

Damper," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 128, 2006, pp. 295-302.

(4) Sodano, H. A., Bae, J.S., Inman, D. J., and Belvin, W. K., "Modeling and Application of Eddy Current Damper for Suppression of Membrane Vibrations," AIAA Journal, Vol. 44, No. 3, 2006, pp. 541-549.