

와전류 댐퍼의 동적특성

Dynamic Characteristics of Eddy Current Damper

곽동기[†] · 배재성* · 황재혁**
 Dong-gi Kwag, Jae-Sung Bae, Jai-Hyuk Hwang

Key Words : ECD(와전류 감쇠기), Eddy current(와전류), Hysteresis damping(이력감쇠), Viscous damping(점성감쇠)

ABSTRACT

This paper is concerned with a new concept for the damper without neither a coil spring nor fluid. The new damper concept consists of the permanent magnets and the cylinder of the conducting material. The opposite pole magnets produces the repulsive forces and this is substituted for the coil spring. The relative motion between the magnets and conducting cylinder produces eddy currents thus resulting in the electromagnetic force, which turns out to be the damping force thus and is substituted for a damping fluid. This damper is called the eddy current damper(ECD). The important advantage of the proposed ECD is that it does not require the damping fluid and any external power and is non-contacting and relatively insensitive to temperature. In the present study, the proposed ECD was constructed and experiments were performed to investigate its dynamic characteristics. The experiments shows that the proposed ECD has the excellent damping ability.

1. 서론

스마트 구조물(smart structures)을 위한 진동 제어기(vibration controller)의 설계에 있어서, 고성능의 제어 알고리즘과 함께 효율적인 작동기의 개발에 많은 노력들이 이루어져 왔다. PZT, terfenol-D, ER, MR, SMA와 같은 스마트 재료들은 그러한 작동기의 후보로써 연구되어져 왔다. 이러한 작동기에 추가적으로, 자석과 전도체 사이의 상대적 운동에 의해 전자기력(electromagnetic force)이 발생하고, 이 힘은 감쇠력으로 사용될 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. 그러나, 전도체의 전기저항(electrical resistance)에 의해 유도전류는 열로 사라지게 되며, 반발력도 사라지게 된다. 동적 시스템(dynamic system)의 경우는 움직이는 전도체가 자기장내에 있게 되면 기전력(electromotive force, emf)이 발생하게 되고, 유도전류를 다시 발생시켜 전도체의

속도에 비례하는 반발력을 발생시킨다. 이 전류는 소산되기 때문에 시스템의 에너지는 없어지게 된다. 따라서, 자석과 전도체는 점성 감쇠기(viscous damper)와 같은 역할을 하게 된다. 감쇠 목적의 와전류 사용에 대한 개념은 1800년대 말에서부터 상당히 오랫동안 알려져 왔지만, 과거 수십년간 가장 많이 연구되고 개발된 와전류 감쇠시스템은 반영구적(semi-permanent)이며, 비접촉식(non-contacting) 자기 브레이크(magnetic braking) 시스템(1-4)이다.

최근 들어 광문규 등(5)은 외팔보에 장치된 와전류 감쇠기(ECD)의 영향을 실험적으로 조사하였고, 감쇠기가 진동억제를 위한 효과적 장치가 될 수 있음을 보였다. 배재성 등(6)은 참고문헌(5)의 와전류 감쇠기에 대한 이론적 모델을 수립하여 검증하였으며, 이를 이용하여 ECD의 감쇠특성을 조사하였다. Sodano et. al.(7-9)은 보의 운동방향으로 영구자석의 축을 설치하여 보의 진동(transverse vibration)

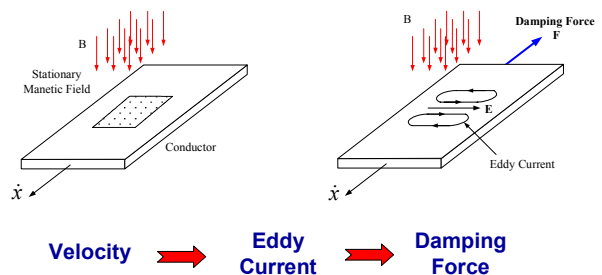


Fig. 1 Damping force due to eddy current

[†] 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원
 책임저자, 전임강사, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부
 * E-mail : jsbaae@hau.ac.kr
 Tel : (02) 300-0102 Fax : (02) 3158-4429
 ** 교수, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

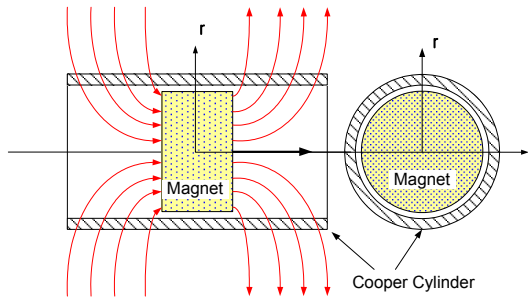


Fig. 2 The permanent magnet in a conductive tube

을 제어하는 방법에 대한 이론 및 실험적 연구를 수행하였다. 이 방법은 단순하면서도, 매우 큰 감쇠력을 얻을 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 이러한 전자기 감쇠력을 이용한 와전류 감쇠기를 제작하여 실험을 통해 동특성에 대한 연구를 수행하였다. 점성 감쇠의 한 형태인 ECD는 자석간의 거리에 따라 감쇠력(damping force)과 감쇠계수(damping ratio)가 달라지므로 에너지 측면에서 감쇠력을 분석하고자 한다.

2. 원형 실린더 내의 와전류 감쇠이론

본 연구에서 제작한 와전류 감쇠기는 구리 실린더 내에 5개의 영구자석을 다른 극을 마주보도록 배치하였다. 영구자석간의 극성이 다르므로, 서로 밀어내는 힘(척력)이 발생하게 되고, 평형상태를 이루게 된다. 서로 다른 극성을 가진 영구자석이 전도체 튜브 내에서 운동을 한다면, 자석간의 척력이 발생함과 동시에 전도체 튜브와 전자석간의 상대운동으로 인해 와전류 감쇠가 발생하게 된다. 따라서, 전도체 튜브 내의 영구자석을 이용한 와전류 감쇠기는 감쇠력 뿐만 아니라, 복원력도 발생하게 된다. Fig. 2는 구리실린더 내에서 운동하고 있는 영구자석에 의한 자기 플럭스 밀도분포를 보여준다.

영구자석에 의한 자기장내에서 움직이는 전도체에 유도되는 전류밀도(current density) \vec{j} 는 표면전하를 무시하면 다음과 같다.

$$\vec{j} = \alpha (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

여기서, \vec{v} 와 \vec{B} 는 각각, 전도판이 움직이는 속도와 자기 플럭스 밀도이며, $\vec{v} \times \vec{B}$ 는 전류밀도 \vec{j} 를 유도하는 기전력이다. 식(1)로부터 유도전류는 속도와 자기장의 수직성분 값에 비례함을 알 수 있다. 수직방향의 자기장에 대해 전도체가 수평방향으로 움직이기 때문에 와전류가 발생하게 된다. 와전류와 자기장에 의한 전자기력의 방향은 전도체의 운동방향과 반대이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F} = \int_V \vec{j} \times \vec{B} dV \quad (2)$$

식(1)과 식(2)로부터 와전류에 의한 감쇠력을 구하기 위해서는 자석에 의한 자기 플럭스 밀도의 분포를 알아야 한다. 실린더 모양의 자석에 의한 자기밀도 분포는 자석의 극성축에 대칭이므로, 반경방향으로의 자기 밀도 분포를 구하여 원호방향으로 적분하면 된다.

3. 와전류 감쇠기의 설계 및 실험장치

와전류 감쇠기는 점성유체를 이용한 감쇠기와 달리, 영구자석과 전도체 튜브만으로 스프링-댐퍼 시스템을 구성할 수 있으므로 매우 단순하다. Fig. 3은 영구자석과 구리 실린더로 구성된 전자기 스프링-댐퍼 시스템의 개념도를 보여준다. 서로 반대의 극성으로 인해 영구자석들은 척력이 작용하게 되고, 피스톤을 움직이게 되면 영구자석들이 가까워져서 척력이 더 커지게 되므로, 복원력이 발생하게 된다. 이와 함께 구리 실린더 벽면에 대한 자석들의 상대 운동으로 인해 실린더 벽면에는 와전류가 발생하게 되고, 결과적으로 영구자석의 운동을 방해하는 감쇠력이 발생하게 된다.

Fig. 4는 실린더 형태 ECD의 Cad Model을 나타내고 있다. 전기전도율이 매우 우수한 구리재질의 실린더내에 5개의 영구자석(NdFeB)을 반발력이 발생 하도록 배치를 하였다. Ball bearing을 사용하여 외부 가진력에 의한 pin의 왕복 운동시 실린더와의 마찰력을 최소화 했고, align을 맞추는 역할을 한다. 또한 영구자석에 의한 외부의 영향을 최소화

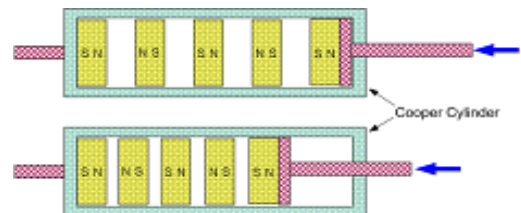


Fig. 3 Concept of ECD system

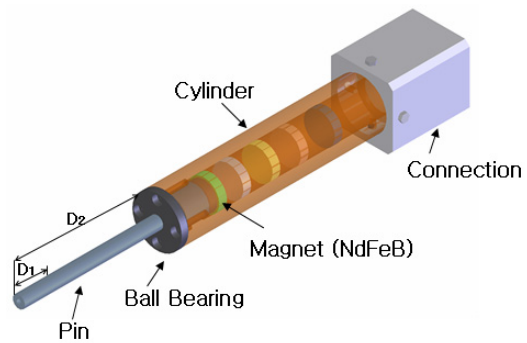


Fig. 4 Schematic of eddy current damper

화 하기 위해서 pin, connection은 SUS304 재질로 구성하였다.

Fig. 5는 ECD 동특성 실험을 하기위해 만능시험기(MTS 810 material system)에 장착한 모습이다. 동특성 실험을 하기에 앞서 인장압축시험기에 장착된 loadcell은 10ton급으로 ECD를 실험하기에 적합하지가 않다. 본 연구에서는 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 50kgf 로드셀을 사용했다. ECD에 가진력을 가하기 위해서 pin 끝단으로부터 약 10.5mm(D_1)부분을 지그로 압착을 하였다.

ECD의 상단은 고정이 되어 있고, 하단의 pin 부분은 수직방향으로 D_2-D_1 길이 만큼 자유단으로, pin의 위치에 따라서 영구자석간의 간격 차이로 인해 감쇠계수(damping ratio), 감쇠력(damping force) 이 달라진다. pin의 수직방향으로 움직인 위치에 따라서 감쇠계수, 감쇠력이 달라 지므로, 본 실험은 힘-변위 곡선을 취득하여 Hysteresis loop를 통해서 에너지 측면에서 동특성을 분석했다. 동특성을 분석하기 위한 실험 변수로 ECD에 가해지는 조화가진력과 pin의 위치를 변화시켰다. 압착된 길이 D_1 으로부터 40mm, 50mm (D_2-D_1) 위치에서 동특성 실험을 수행 하였다.

4. 와전류 감쇠기의 동특성 파악

4.1 ECD의 선형성

와전류 감쇠기의 동특성을 알아보기 이전에 linearity test를 수행하였다. Fig. 6은 pin의 압착 위치로부터 수직방향으로 60mm 이동시의 힘-변위 곡선을 나타낸다.

수직 방향으로 약 30mm까지는 일정한 강성(stiffness)을 지니고 선형적으로 증가하고 있다. 선형 구간이 끝나고 30-60mm 사이의 비선형 구간이 나타난다. 비선형구간의 원인은 다음과 같이 설명할 수 있다. 전류 밀도는 영구 자

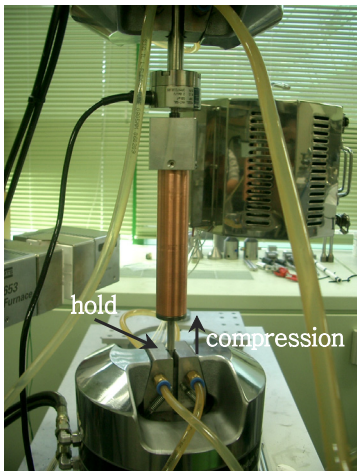


Fig. 5 Schematic of experimental system

석이 움직이는 속도와 자기 플럭스의 크기에 비례하고, 영구 자석간 거리의 제곱에 반비례하기 때문에, 30mm 이후에는 영구 자석간의 거리에 대한 영향이 더 크게 영향을 미친다는 결과를 얻을 수 있었다.

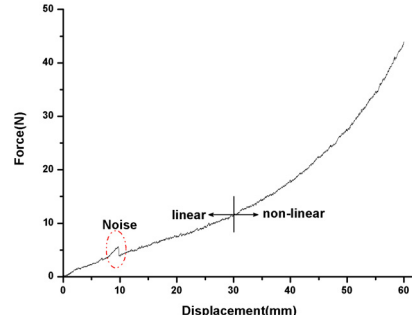
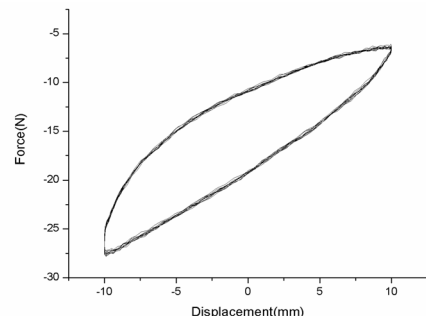
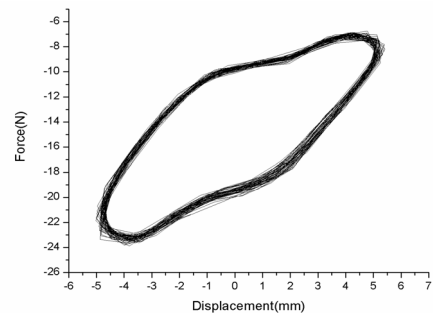


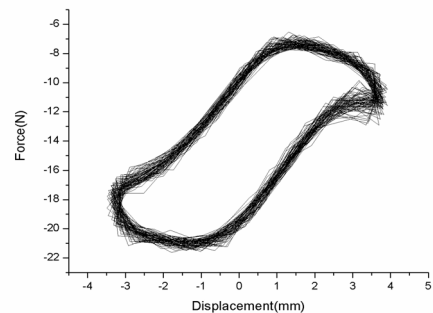
Fig. 6 Linearity test of ECD



(a) Excitation frequency : 1Hz



(b) Excitation frequency : 5Hz



(c) Excitation frequency : 7Hz

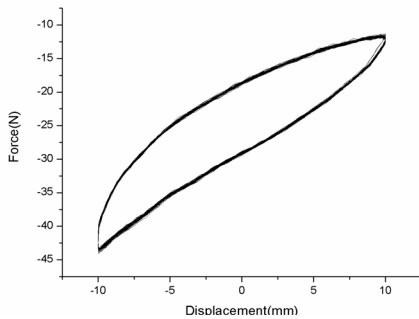
Fig. 7 Force-displacement hysteresis loop-located at a distance of 40mm

4.2 와전류 감쇠기의 동특성

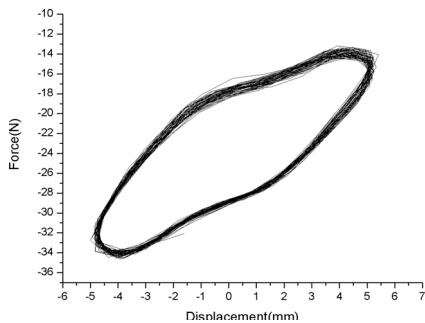
만능시험기(MTS 810 material system)를 이용하여 ECD의 동특성 실험을 수행하였다. ECD에 가해진 가진력은 3가지형태로, 가진력의 크기는 만능시험기의 사양에 적합한 진폭과 가진주파수를 정하여 설정하였다.

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (3)$$

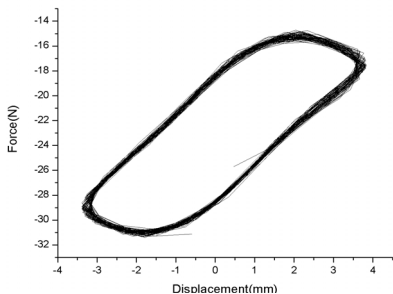
식(3)에서 $A = \pm 10, 5, 3.5$ $\omega_n = 10, 5, 7$ 설정 하여 ECD의 위치(40, 50mm)에 따라서 피로시험을 수행하였다. 영구자석간 거리에 따른 자장의 변화는 ECD의 감쇠력에 영향을 미친다. Fig. 7와 Fig.8은 수직방향으로 40mm, 50mm위치에서 힘-변위간의 이력곡선(hysteresis loop)을 나타낸다.



(a) Excitation frequency : 1Hz



(b) Excitation frequency : 5Hz



(c) Excitation frequency : 7Hz

Fig. 8 Force-displacement hysteresis loop-located at a distance of 50mm

실험 결과로부터 ECD는 주기적인 가진력에 의한 히스테리시스(hysteresis)성질을 갖는 점탄성 댐퍼의 특징을 가지고 있다. 이력곡선(hysteresis loop)에 의해 둘러싸인 면적은 pin의 압축, 인장에 따른 에너지 손실과 같다. 이 면적은 주파수와 무관하며, 다음과 같이 가진 진폭의 제곱과 강성에 비례한다는 것을 알 수 있다.

$$\Delta E = \pi k \beta X^2 \quad (4)$$

여기서, k 는 강성, X 는 진동의 진폭, $k\beta$ 는 이력감쇠계수(hysteric damping coefficient)로 정의 된다(10). 또한, 등가감쇠계수(equivalent damping coefficient)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{eq} = \frac{k\beta}{\omega} \quad (5)$$

Table 1은 Fig. 7과 Fig. 8의 힘과 변위 선도로부터 구한 소산되는 에너지와 이력감쇠계수 $k\beta$ 등가감쇠계수 C_{eq} 를 보여준다. Table. 1로부터 50mm위치에서 소산되는 에너지가 40mm 경우보다 더 크음을 알 수 있다. 이는 자석간의 큰 반력과 자기장의 증가로 인한 와전류 감쇠의 증가 때문이다. 이력감쇠계수는 가진주파수의 증가로 인해 더 커지며, 가진주파수가 1Hz인 경우, 상대적으로 작은 이력감쇠계수값을 가짐을 알 수 있다. 등가감쇠계수는 가진주파수가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

Table. 1 Energy Dissipation of eddy current damper

분류	ΔE		$k\beta$		C_{eq}	
	40mm	50mm	40mm	50mm	40mm	50mm
1Hz	127	162	0.4044	0.516	0.0644	0.0821
5Hz	66	76.5	0.8407	0.974	0.0268	0.031
7Hz	33.5	42	0.87	1.09	0.0198	0.0247

5. 결론

본 연구에서는 서로 다른 극성을 가진 영구자석이 전도체 튜브 내에서 운동을 한다면, 자석간의 척력이 발생함과 동시에 전도체 튜브와 전자석간의 상대운동으로 인해 와전류 감쇠가 발생하는 원리를 소개하고, 이를 이용한 ECD 감쇠기를 제작하였다. 기존의 다른 감쇠 방법과 달리 ECD는 적용이 매우 간단하고, 비접촉식이다. 또한, 감쇠를 위해 외부로부터 에너지가 필요하지 않고, 영구자석과 전도체의 간단한 적용에 의해 매우 큰 감쇠효과를 얻을 수 있다. 시험을

통해 ECD의 동특성을 에너지 측면에서 분석하였고, 매우 우수한 감쇠특성을 가짐을 확인하였다. 본 연구에서는 영구 자석을 사용하였으나, 전자석을 이용한다면 외부 조건에 따른 감쇠력의 크기를 제어 할 수 있으며, 이에 대한 적용 분야는 다양할 것으로 예상된다.

AIAA Journal, Vol. 44, No. 3, 2006, pp. 541-549.

(10) Inman, D.J., 1994. Engineering Vibration, prentice-Hall

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Wiederick, H.H., Gauthier, N., Campbell, D.A., and Rochon, P., "Magnetic braking : Simple Theory and Experiment," American Journal of Physics, Vol. 55, No. 6, 1987, pp. 500-503.
- (2) Heald, M.A., "Magnetic Braking : Improved Theory," American Journal of Physics, Vol. 56, No. 6, 1988, pp. 521-522.
- (3) Cadwell, L.H., "Magnetic Damping : Analysis of an Eddy Current Brake using an Airtrack," American Journal of Physics, Vol. 64, 1996, pp. 917-23.
- (4) Lee, K. J. and Park, K.J., "A Contactless Eddy Current Brake System," IEEE Conf. on Intelligent Processing Systems, IEEE Conf. on Intelligent Processing Systems, Australia, Dec. 1998, pp. 193-197.
- (5) Kwak, M. K., Lee, M. I., and Heo, S., "Vibration Suppression Using Eddy Current Damper," Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 10, 2003, pp. 760-766.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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,"