

Eddy Current Damping을 이용한 진동제어

Vibration Suppression of using Eddy Current Damping

곽동기*, 배재성, 황재혁(한국항공대학교)

1. 서 론

구조물의 개념은 통상 지금까지는 수동적이며, 고정적인 하중담당 기능이 대부분이었다. 하지만 기술이 급격히 발달하고 있는 현재의 구조물은 내부의 이상 유무를 판단하고 감지하여 원하는 상태나 조건으로 제어 가능한 스마트구조물로 대체되고 있다. 스마트 구조물을 위한 진동저감 대책은 많은 연구가 진행 되어져 왔다. 진동제어기 설계에 있어서 기존의 진동 억제(vibration suppression)에 관한 연구들은 점성 감쇠나 압전재료와 같은 기능성 재료를 이용한 수동적 혹은 능동적 진동제어가 대부분을 이루고 있다. 하지만 본 연구에서는 차세대 스마트 재료로 자석과 전도체 사이의 상대적 운동에 의해 발생한 전자기력을 이용하여 진동감쇠기를 설계하고자 한다. 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 전기 저항에 의해 유도전류는 열로 사라지게 되며, 반발력도 사라지게 된다. 동적 시스템(dynamic system)의 경우는 움직이는 전도체가 자기장 내에 있게 되면 기전력이 발생하게 되고, 유도전류를 다시 발생시켜 전도체의 속도에 비례하는 반발력을 발생시킨다. 이 전류는 소산되기 때문에 시스템의 에너지는 없어지게 된다. 따라서 자석과 전도체는 점성 감쇠기와 같은 역할을 하게 된다.

감쇠목적의 와전류에 대한 개념은 상당히 오랫동안 알려져 왔지만, 과거 수십년간 가장 많이 연구되고 개발된 와전류 감쇠시스템은 반영구적(semi permanent)이며, 비접촉식 자기 브레

이크(magnetic braking)시스템[1-4]이다. Takagi et. al.[5]은 자기장 내에 있는 얇은 판의 처짐에 대한 해석 및 실험적 연구를 수행하였으며, 수백 암페어의 높은 전류를 사용하는 전자석을 사용하였다. CSA Engineering Inc.[6]은 우주선의 태양전지판을 위한 자기(magnetic) TMD와 우주왕복선의 페이로드(payload)를 위한 자기적 감쇠 차단 장치(magnetically damped isolation mount)에 대한 연구를 수행하였다. Matsuzaki et. al.[7]은 부분적으로 자화된(magnetized) 보가 전자기력에 의해 감쇠되는 새로운 진동제어 시스템을 제안하였으며, 제안된 시스템의 효율성을 증명하기 위해 두 개의 자화된 요소(segment)가 있는 보의 진동제어에 대한 이론적 연구를 수행하였다. 최근들어, Kwak et. al.[8]은 외팔보에 장치된 와전류 감쇠기의 영향을 실험적으로 조사하였고, 감쇠기가 진동억제를 위한 효과적 장치가 될 수 있음을 보였다. Bae et. al.[9]은 Kwak et. al.[8]의 와전류 감쇠기에 대한 이론적 모델을 수립하여 검증하였으며, 이를 이용하여 ECD의 감쇠특성을 조사하였다.

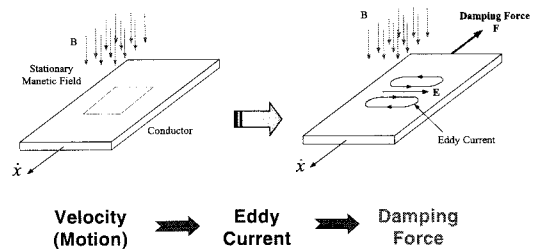


Fig. 1 Damping force due to eddy current

본 연구에서는 이러한 전자기 감쇠력을 이용한 두 가지 모델을 제시하였다. 첫째, 영구자석과 보에 접착된 얇은 구리판을 이용한 보의 진동억

제 효과. 둘째, 전자기 스프링-댐퍼 시스템의 자석간의 거리에 따른 감쇠력(damping force)과 감쇠계수(damping ratio)를 실험적 방법을 통해서 검증하고 타당성을 검증하고자 한다.

2. 전자기 감쇠

Fig. 2는. 영구자석에 의해 보에 수직으로 작용하는 자기장 성분과 보에 평행하게 작용하는 자기장 성분을 보여준다. 두 성분 중 평행하게 작용하는 자기장 성분과 이에 수직인 보의 운동에 의해 전자기력이 발생하게 된다. 이 전자기력의 방향이 보의 운동방향과 반대이므로 감쇠력이 된다. Fig. 3은 원형 구리실린더 내에서의 와전류 감쇠이론을 나타낸다. 구리 실린더 내에 5개의 영구자석을 다른 극을 마주보도록 배치하였다. 서로 다른 극성을 가진 영구자석이 전도체 튜브 내에서 운동을 한다면, 자석간의 척력이 발생함과 동시에 전도체 튜브와 전자석간의 상대운동으로 인해 와전류 감쇠가 발생하게 된다. Surface charge를 무시하면 수직방향으로 움직이는 전도체 표면에 발생하는 전류밀도(current density) J 는 아래와 같다.

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

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.

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

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 극성 축에 대칭이므로, 반경방향으로의 자기 밀도 분포를 구하여 원호방향으로 적분하면 된다.

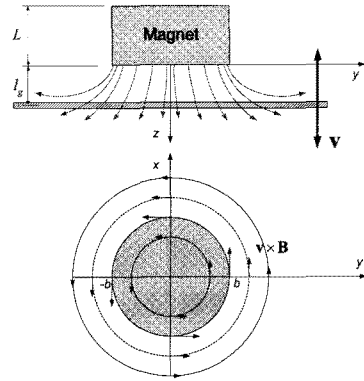


Fig. 2 Radial Electromagnetic Damping mechanism

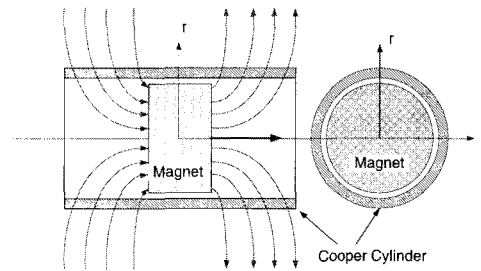


Fig. 3 The permanent magnet in a conduct tube

3. 전자기력을 이용한 보의 진동 억제

전자기 감쇠력에 의한 보의 진동억제를 확인하기 위해 Fig. 4와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험은 영구자석과 전도체 사이의 거리 변화에 대한 감쇠특성을 조사할 수 있도록 거리를 변화시키면 FRF를 구하였다.

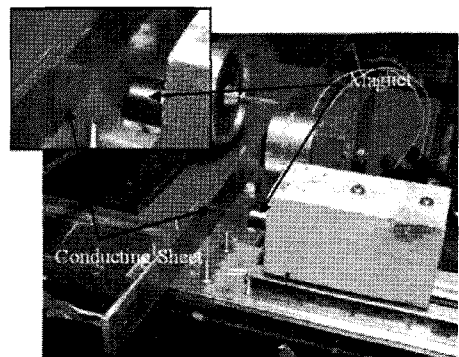


Fig. 4 Experimental set up of the aluminum beam and eddy current damper

보의 진동억제에 대한 전자기 감쇠력의 성능을 조사하기 위해 영구자석을 설치할 경우와 그렇지 않은 경우의 주파수 응답함수를 구하였다. Fig. 5은 전자기 감쇠가 있는 경우와 없는 경우의 주파수함수를 보여준다. 보의 첫 번째 모드는 진동이 약 42.4dB 감소하였으며, 두 번째 모드와 세 번째 모드는 각각 21.9dB과 14.3dB 감소하였다. Fig. 6은 영구자석과 전도체 사이의 거리 변화에 대한 첫 번째 진동모드의 감쇠비(damping ratio)의 변화를 보여준다. 실험결과에 대해 감쇠모델에 의해 예측된 결과가 잘 일치함을 알 수 있으며, 거리의 증가에 의해 감쇠력이 감소함을 알 수 있다.

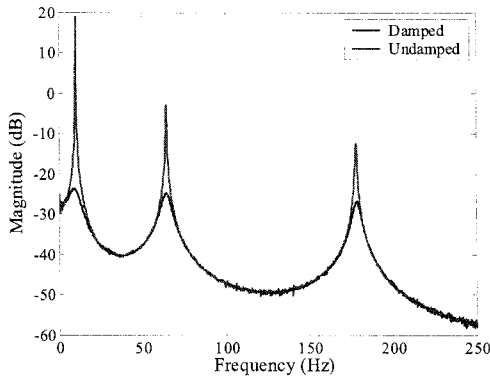


Fig. 5 Beam response to an initial displacement with magnet located a distance of 4mm

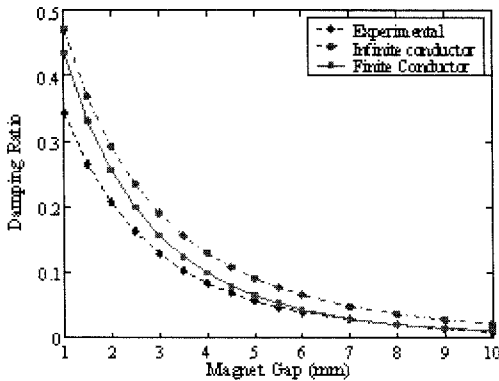


Fig. 6 Experiment and predicted damping ratio

4. 전자기력을 이용한 스프링-댐퍼 시스템

Fig. 7는 스프링-댐퍼 시스템을 만능시험기(MTS 810 material system)에 장착한 모습이다. 전도율이 매우 우수한 구리재질의 실린더내에 5개의 영구자석(NdFeB)을 반발력이 발생하도록 배치를 하였다. Ball bearing을 사용하여 외부 가진력에 의한 pin의 왕복 운동시 실린더와의 마찰력을 최소화 했고, aline을 맞추는 역할을 한다. 또한 영구자석에 의한 외부의 영향을 최소화 하기 위해서 pin, Loadcell Jig는 SUS304 재질로 구성하였다.

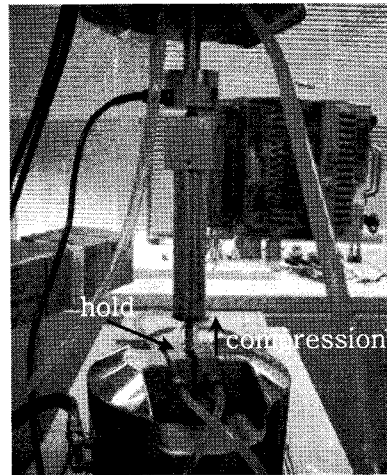


Fig. 7 Schematic of experimental System

만능시험기를 이용하여 스프링-댐퍼 시스템의 동특성 실험 결과로부터 주기적인 가진력에 의한 히스테리시스(hysteresis) 특성을 파악하였고, 이 면적은 주파수와 무관하며, 다음과 같이 가진 진폭의 제곱과 강성에 비례한다는 것을 알 수 있다.

$$\Delta E = \pi k \beta X^2 \tag{4}$$

여기서, k는 강성, X는 진동의 진폭, $k\beta$ 는 이력감쇠계수(hysteric damping-coefficient)로 정의된다. 또한, 등가감쇠계수(equivalent damping coefficient)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{eq} = \frac{k\beta}{\omega} \tag{5}$$

Table 1은 에너지와 이력감쇠계수 $k\beta$, 등가감쇠계수 C_{eq} 를 보여준다. Table. 1로부터 50mm

위치에서 소산되는 에너지가 40mm 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 이력감쇠계수는 가진주파수의 증가로 인해 더 커지며, 가진주파수가 1Hz 인 경우, 상대적으로 작은 이력감쇠계수값을 가짐을 알 수 있다. 등가감쇠계수는 가진주파수가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

Table. 1 Energy Dissipation of eddy current damper

분 류	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. 결 론

본 연구에서는 영구자석과 도체 사이의 상대 운동으로 발생하는 전자기력을 이용한 ECD의 감쇠원리를 설명하였고, 두 가지 모델을 제시하여 타당성을 검증하였다. 첫째, 구리판이 접촉되어 있는 외팔보와 일정한 거리를 두고 설치된 영구자석을 이용하여 아무런 접촉 없이 3개의 모우드에 대해 매우 큰 감쇠특성이 있음을 확인하였다. 둘째, 스프링-댐퍼 시스템을 구성하여 영구자석과 전도체 튜브 간의 상대운동으로 발생한 와전류 감쇠효과를 에너지 측면에서 분석한 결과 감쇠성능을 확인 할 수 있었다.

추후에 전자석을 이용한다면 외부 조건에 따른 감쇠력의 크기를 제어 할 수 있으며, 이에 대한 적용 분야는 다양할 것으로 예상된다.

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) Takagi, T., Tani, J., Matsuda, S., and Kawamura, S., "Analysis and Experiment of Dynamic Deflection of a Thin Plate with a Coupling Effect," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, 1992, pp. 1259-1262.

6)CSA Engineering www.csaengineering.com.

7) Matsuzaki, Y., Ishikubo, Y., Kamita, T., and Ikeda, T., "Vibration Control System Using Electromagnetic Forces," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, 1997, pp. 751-756

8) 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.

9) 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.