論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.9.832>

자기효과를 이용한 충격흡수장치의 감쇠계수에 관한 연구

이미선*, 배재성**, 황재혁**, 황도순***

Study on Damping Coefficient of Shock Absorber
with Magnetic Effects

Mi-Seon Yi*, Jae-Sung Bae**, Jae-Hyuk Hwang**, Do-Sun Hwang***

ABSTRACT

The shock absorber with magnetic effect is suggested for a lunar lander. The shock absorber consists of a metal tube, a piston rod, and several permanent magnets moved by a piston rod in the tube, and the shock energy can be dispersed and dissipated by magnetic effects such as the magnetic force existed between a metal and magnets and the eddy current effect generated by a relative motion with a conductor and magnets. Besides, the shock-absorbing effect similar to that of a coil spring can be obtained by arranging the magnets in line, which are facing the same polar each other. The device has a very simple structure and is usable in space due to the unnecessariness of any oil or gas. The shock absorber was designed and manufactured for experiments and its spring and damping characteristics were studied by the theoretical, analytical and experimental methods.

초 록

본 연구는 달착륙선의 착륙장치 개발 연구로써 자기효과를 이용한 충격흡수장치를 제안한다. 충격흡수장치는 금속튜브와 피스톤 로드(piston rod), 피스톤 로드를 따라 가진되는 영구자석으로 구성되며 금속튜브와 영구자석사이에 존재하는 자기력과 상대운동에 의해 발생하는 와전류 효과 등의 자기효과를 이용하여 충격에너지를 분산 및 소산시킨다. 또한 자석을 같은 극을 마주보게 배치함으로써 코일 스프링과 유사한 충격흡수 효과를 얻을 수 있다. 이 장치는 구조가 단순하고 오일이나 가스의 사용이 불필요하므로 우주공간에서 사용이 용이하다. 자기 효과를 이용한 충격흡수장치의 감쇠와 스프링 특성을 전자기학 이론과 유한요소해석을 통하여 관찰하고 장치를 설계, 제작하여 실험을 수행한 결과와 비교분석하였다.

Key Words : Magnetic effect(자기 효과), Eddy current effect(와전류 효과), Magnetic spring(자기 스프링), Electromagnetic shock absorber(전자기식 충격흡수장치)

1. 서 론

† 2011년 5월 9일 접수 ~ 2011년 8월 25일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학과 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : jsbae@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

*** 정회원, 한국항공우주연구원

정부의 '우주개발진흥 기본계획'에 의하면 나로호의 뒤를 이을 후속 발사체인 300t급 한국형 발사체(KSLV-II)를 국내 독자기술로 2018~19년에 개발하여 2020년 쏘아올리고, 확보한 기술을

바탕으로 2020년 달탐사위성 1호, 2025년에는 착륙선인 달탐사위성 2호를 개발하도록 예정되어 있다. 달착륙선은 달의 샘플을 채취하여 지구로 귀환하는 임무를 수행하게 되며, 따라서 안전한 착륙을 가능하게 하는 충격흡수장치를 필요로 한다. 탐사에 성공한 미국의 서베이어(Surveyor)와 피닉스(Phoenix), 구소련의 베네라(Venera) 등은 알루미늄 허니컴이나 에어백, 낙하산을 이용하여 착륙시 충격을 완화하였다.

본 논문은 달탐사선의 착륙장치로서 자기효과를 이용한 충격흡수장치의 개발을 제안한다. 장치는 금속튜브와 피스톤 로드(piston rod), 튜브 내부에 들어가는 링형(ring-type) 영구자석, 자석을 관통하는 가이드 로드(guide rod)로 구성되어 충격이 가해지면 피스톤 로드가 금속튜브 내부로 밀려들어가고, 동시에 자석이 관내부에서 가이드 로드에도 의해 가진된다.

튜브의 재질이 구리나 알루미늄과 같은 도체라면 자석과의 상대운동에 의해 도체 표면에 와전류가 발생할 것이다. 생성되는 전류의 방향은 자기력선속의 변화를 방해하는 자기장을 생성하는 방향으로 설정되고 생성된 자기장은 외부자기장과 인력관계가 되거나 반력관계가 됨으로써 Fig. 1에 나타낸 것처럼 운동방향의 반대방향으로 감쇠력이 발생하는 효과를 낸다. 생성된 와전류는 전도체의 전기저항에 의해 열로 소산된다.

스틸 파이프(steel pipe)가 금속 튜브로 사용되면 강자성체와 자석사이 존재하는 자기력 때문에 자석이 이동하는데 큰 힘이 필요할 것이다. 즉, 충격에너지를 자석을 이동시키는 일로 소모되게 함으로써 충격을 완화할 수 있다.

다수의 자석을 같은 극이 마주보게 나열하여 두면 자석사이 간격을 유지할 수 있고 자기효과가 중첩되어 충격완화성능이 강화된다. 그리고 피스톤 로드에도 의해 압축되어 자석간 간격이 줄어들에 따라 자석의 척력이 급격하게 증가하므로 코일 스프링과 유사한 완충역할을 한다.

와전류 효과에 의한 감쇠력을 충격흡수장치 [1-6]나 제동[7], 진동저감[8-10] 등에 적용하려는 연구가 수행된 바 있다. 자석은 외부 에너지 공급이 필요하지 않고 반영구적인 사용이 가능하다. 자석과 도체는 비접촉 상태에서 상대운동하여 감쇠력을 얻기 때문에 가스나 오일 댐퍼가 갖는 실링(sealing)의 어려움이나 마모로 인한 성능저하와 부품 교체의 문제가 없다. 다만, 발생하는 감쇠력이 작아 적용 용량에 한계가 있으므로 본 장치는 와전류 감쇠력과 함께 자기 스프링과 강자성체와 자석사이 자기력을 이용하여 충격흡수

용량을 증대시키고자 한다.

본 연구에서는 달탐사선에 사용될 자기효과를 이용한 충격흡수장치의 설계에 이용하기 위해 자기효과에 의한 감쇠 및 스프링의 동특성 연구를 수행하였다. 따라서 간단한 감쇠, 스프링 모델을 설정하였고 사용된 자석과 금속관의 물성치는 Table 1에 제시하였다. 자석은 크기에 비해 자력이 강한 네오디움(Neodyum) 자석으로 선정하였고 금속관은 구리와 알루미늄, 스텔, 구리/스텔관으로 종류를 달리하였다. 각 재료의 상용 규격 중 가장 유사한 크기의 관을 사용하였기 때문에 내경과 두께가 정확히 일치하지 않는다. 내경의 차이는 근소하므로 무시하고 각각 두께와 질량을 고려하여 재질에 따른 감쇠력을 비교하였다. 전자기학 이론을 바탕으로 수학적 모델링을 수립하고 장치에 대한 이론적인 감쇠력을 수치적으로 계산하였다. 유한요소해석 프로그램을 이용하여 모델링하고 해석을 통해 감쇠력을 예측하였으며 장치를 설계 및 제작하고 유압식 가진기를 이용한 동특성 실험을 통해 감쇠력을 측정하였다. 이처럼 이론적, 해석적, 실험적으로 동시에 접근하고 상호 검증함으로써 현상을 정확히 이해하고 신뢰성이 높은 예측모델을 수립하고자 한다.

Table 1. Properties of magnet & tubes

영구자석				
재질	내경 (mm)	외경 (mm)	두께 (mm)	보자력 (A/m)
NdFeB 35	6	30	10	890,000
금속관				
재질	내경 (mm)	두께 (mm)	전도도 (S/m)	질량 (kg)
구리	32.12	1.4	5.8E7	0.49
알루미늄	32	2	3.8E7	0.25
스텔	32	1	0.2E7	0.39
구리(내) /스텔(외)	32.12	1.4(내) /1.6(외)	-	0.96

Fig. 1. Concept of eddy current effect

II. 본 론

2.1 수학적 모델링

와전류효과에 대한 이론은 전자기학 이론[11]을 바탕으로 이미 여러 논문에서 정립되어 있으므로 참고하여 논문의 모델에 맞게 유도하고 수치적 계산 코드를 작성하였다[2-5]. 실린더형 영구자석이 M_0 로 균일하게 자화되었다고 가정하면 Fig. 2의 실린더 옆면형상의 전류밀도 시트(sheet)로 등가 모델링되며 원형 폐회로의 선형중첩으로 계산된다. 비오-사바르 법칙(Biot-Savart Law)을 적용하여 P 위치에서 미소길이 $d\mathbf{l}$ 에 의해 가해지는 자기장을 식 (1)로 구한다.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 M_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{R}_1}{R_1^3} \quad (1)$$

위치벡터를 풀어서 정리하고 Φ 방향으로 적분하여 원형 폐회로에 의한 P위치에서 자기장을 식 (2)로 구한다.

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

로렌츠 법칙에 의하여 와전류와 자기장 사이에 발생하는 힘을 구하고, 전체 자석두께로 적분하여 식 (3)으로 감쇠력을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_d &= \int_V \vec{J} \times \vec{B} dV \\ &= \int_V \sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B} dV \\ &= v 2\pi \sigma \delta y \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} B_y^2(y, z) dz (-\hat{k}) \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 2. Modeling of cylindrical magnet

Fig. 3. Modeling of magnetic spring

유도된 식의 결과, 힘이 속도 v 에 비례하므로 감쇠계수를 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$C_{damping} = 2\pi\sigma\delta y \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} B_y^2(y, z) dz \quad (4)$$

자기 스프링 힘(magnetic spring force)은 쿨롱의 법칙(Coulomb's Law)으로 유도된다. 자석표면을 r 방향과 ϕ 방향으로 미소 분할하여 점전하를 가정하고, 두 점전하사이의 힘을 표면에 대해 적분함으로써 마주보는 표면 사이에 발생하는 척력을 계산할 수 있다. 두 자석사이에는 총 네 개의 표면이 서로 마주보고 있다. Fig. 3에 나타난 것처럼 두 쌍의 면은 서로 인력관계에 있고 두 쌍의 면은 서로 반력관계에 있으므로 모든 힘을 합하여 최종적인 스프링 힘을 식 (5)로 나타낸다. 수식에 사용된 변수는 Table 2에 정리하였다.

$$\begin{aligned} F_{s,T} &= \frac{\mu_0 M_0^2}{4\pi} \left(\frac{\pi b^2}{N_r N_\phi} \right)^2 \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_\phi} \sum_{ii=1}^{N_r} \sum_{jj=1}^{N_\phi} \\ &\quad \left(\frac{1}{[r_i^2 + r_{ii}^2 - 2r_i r_{ii} \cos(\phi_j - \phi_{jj}) + d^2]^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{d+2h}{[r_i^2 + r_{ii}^2 - 2r_i r_{ii} \cos(\phi_j - \phi_{jj}) + (d+2h)^2]^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2(d+h)}{[r_i^2 + r_{ii}^2 - 2r_i r_{ii} \cos(\phi_j - \phi_{jj}) + (d+h)^2]^{3/2}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Tabel 2. Magnetic effect parameters

기호	설명	기호	설명
μ_0	자유공간의 투자율	b	자석 반경
M_0	자화	h	자석 두께
B	자속밀도	d	자석 간 거리
J	전류밀도	δ	도체 두께
F_d	감쇠력	v	상대속도

Fig. 4. FEM model (damping & spring force)

2.2 유한요소해석

전자기장해석이 가능한 상용 유한요소해석 프로그램을 사용하여 와전류효과에 의한 감쇠력과 자기 스프링 힘의 동특성 해석을 수행하였다. 금속관과 두께방향으로 자화된 링형 자석은 축대칭이므로 Fig. 4에 나타난 것처럼 R-Z 평면상에 2차원으로 모델링하였다. 자석이 진폭 20mm, 주파수 1, 2, 3, 4Hz의 사인변위로 가진될 때, 자석과 도체관의 상대운동에 의해 발생하는 와전류 감쇠력과 두 자석의 상대거리가 변함에 따른 자기 스프링 힘을 구하였다.

구리관과 알루미늄관의 와전류 감쇠력 해석결과를 Fig. 5에 힘-변위, 힘-속도 그래프로 나타내었다. 힘-변위 그래프에서 와전류 감쇠력의 발생에 의한 이력곡선의 결과가 나타난다. 힘-속도 그래프에서 와전류 감쇠력은 약간의 이력은 존재하지만 속도에 거의 비례하므로 감쇠계수는 기울기를 측정하여 구할 수 있다.

Fig. 5. FEM results (damping force)

Fig. 6. FEM results (spring force)

스프링 힘의 해석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 가진 자석의 변위에 따른 두 자석사이 척력을 계산한 결과이므로 스프링 힘은 가진 속도에 무관하며 위치의 함수로 나타난다.

2.3 동특성 실험

유한요소해석과 동일한 조건으로 실험을 수행하였다. 실험장치는 Fig. 7에 나타내었고 유압식 가진기로 자석을 진폭 20mm, 주파수 1, 2, 3, 4Hz의 사인변위로 가진시키고 변위측정센서(LVDT)와 로드셀로 시간에 따른 변위와 힘을 측정하였다.

Fig. 7. Experiment (damping force)

Fig. 8. Experiment (spring force)

Fig. 9에 구리관과 알루미늄관의 실험 결과를 힘-변위, 힘-속도 그래프로 나타내었고 유한요소 결과와 유사하다. Fig. 10은 스틸관과 구리에 스틸을 씌운 관의 실험결과이다. 스틸관의 감쇠력이 와전류 감쇠력보다 열배이상 크지만 와전류에 의한 감쇠력과 달리 속도에 비례하지 않고 거의 일정하다. 구리에 스틸을 씌운 관의 결과도 스틸관과 유사한 결과를 보인다. 그러나 힘-속도의 결과그래프에서 구리관에 의한 와전류 감쇠력이 발생함으로 속도가 증가할 때 감쇠력도 다소 증가하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 11은 자기 스프링의 힘-변위 그래프이다.

Fig. 11. Experiment results (spring force)

(a) 구리관

(b) 알루미늄관

Fig. 12. Comparison of eddy current effect

III. 결과 및 검토

와전류 감쇠력에 대하여 수학적 모델링을 수립하여 감쇠계수를 구하는 수치적 계산 프로그램을 개발하였다. 도체관과 자석의 물성치를 적용하여 감쇠계수를 구하였고 동일한 모델에 대한 유한요소해석과 실험을 수행하여 와전류 감쇠력을 구하였다. 감쇠계수와 속도를 곱하여 이론적인 와전류 감쇠력을 구하고, 유한요소해석과 실험 결과에서 각 가진 주파수에서 최대속도, 최대힘을 추출하여 Fig. 12에 결과를 비교하였다. 이론적, 해석적, 실험적 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이론적 결과와 해석적 결과에 비해 다소 실험적 결과에 오차가 있는 것은 실제 물성치는 이론값과 약간의 차이가 있고 실험장치의 고정부품과 가진부품이 연결된 부분에서 접촉마찰이 발생하였기 때문이다. 또한 실험장치의 제작공차에 의해서도 마찰이 발생하였을 것으로 예상된다. 세 결과의 일치성은 논문의 이론적, 해석적, 실험적 접근방법이 타당함을 증명한다.

Fig. 13은 네 종류의 도체관의 감쇠력을 비교한 결과이다. 스틸이 사용되지 않은 경우와 사용된 경우로 뚜렷하게 구분된다. 아래쪽 두 그래프는 각각 구리관과 알루미늄관의 와전류 감쇠

(b) 알루미늄관

Fig. 9. Experiment results (damping force)

(a) 스틸관

(b) 구리/스틸관

Fig. 10. Experiment results (damping force)

력이다. 두 도체관의 와전류 감쇠력 차이가 크지 않다. 왜냐하면 Table 1에서 도체의 전도도는 구리가 알루미늄에 비해 약 1.5배 크지만 두께가 0.7배 작고, 식 (1)에 의해 와전류 감쇠력은 전도도와 두께의 곱에 비례하기 때문이다. 단, 관의 두께가 얇기 때문에 와전류의 발생이 두께전체에서 일어난다고 가정하였다. 착륙장치는 무게를 최소화해야하므로 질량은 중요한 변수이며 구리의 밀도는 알루미늄보다 약 3배 이상 크다. 본 실험 결과에서도 구리관은 알루미늄관보다 약 2배정도 무거운 것에 비해 감쇠력은 최대 1.3배 크다. 따라서 도체관의 재질로 알루미늄을 사용함으로써 구리보다 두께는 다소 두껍지만 더 가볍고 큰 감쇠력을 얻을 것으로 판단된다.

스틸관은 구리관보다 두께가 얇고 가벼우면서 감쇠력은 열배 이상 크다. 그러나 이 힘은 와전류 감쇠력과는 달리 속도가 증가해도 일정하다. 구리에 스틸을 씌운 관의 결과는 큰 힘이 측정되고 속도에 대해 증가하는 경향도 보이므로 두 힘이 중첩되어 나타남을 알 수 있다.

모든 결과를 바탕으로 구리보다 가벼운 알루미늄으로 관의 두께를 충분히 두껍게 하고 얇은 스틸을 표면에 입힌 관을 제작하여 사용한다면 충격흡수장치의 무게와 힘이 절충될 수 있을 것으로 판단된다.

자기 스프링 힘의 결과도 Fig. 14에 나타난 것처럼 이론적, 해석적, 실험적 결과가 일치한다. 단, 실험결과에서 이력현상이 발생하며 가진 속도가 빠를수록 이력곡선의 면적이 넓어지는 경향을 보인다. 이론과 해석에서 고려하지 못한 자석의 비선형성이 실험결과에 나타난 것으로 판단되며 충격흡수장치가 압축되기만 한다면 이를 무시할 수 있지만 잔류진동이 발생한다면 비선형성이 충격흡수성능에 어떤 영향을 미칠지 검토해야할 것이다.

Fig. 13. Comparison of damping force

Fig. 14. Comparison of spring force

IV. 결 론

전자기식 충격흡수장치의 개발을 위하여 자기 감쇠력과 스프링 힘의 동특성을 이론적, 해석적, 실험적으로 관찰하였고 세 결과의 타당성을 상호 검증하였다. 하지만 스틸과 자석사이 감쇠효과와 자기 스프링의 비선형성에 대한 이론적, 해석적인 연구가 보충되어야 한다. 본 연구의 결과를 바탕으로, 요구되는 감쇠와 스프링 힘을 만족시키는 충격흡수장치의 개략적인 설계를 수행할 수 있다. 향후 다수의 자석에 의한 감쇠 효과를 연구하여 구체적인 해석모델을 수립하고, 기계식 충격흡수방식을 결합하여 성능을 보완함으로써 달탐사선에 적용 가능한 충격흡수장치를 설계하고자 한다.

후 기

이 논문은 2011년 한국항공우주연구원의 재원으로 학연협력강화사업 성과창출형과제 (2010-02-051)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- 1) 곽동기, 배재성, 황재혁, “와전류 댐퍼의 동적특성”, 한국소음진동공학회 2007년도 춘계학술대회, KSNVE07S-27-06.
- 2) 박정삼, 배재성, 황재혁, 강국정, “충격 완충장치를 위한 와전류 감쇠기의 동특성 연구”, 한국항공우주학회 2009년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 535-538.
- 3) 박정삼, 배재성, 황재혁, 강국정, “전도체 튜브내의 영구자석에 의한 와전류 감쇠기에 관한

연구”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2009, pp.223.

4) Babak Ebrahimi, Mir Behrad Khamess, M.Farid Golnaraghi, "Design and modeling of a magnetic shock absorber based on eddy current damping effect", Journal of Sound and Vibration, Vol.315, pp.875~889.

5) Babak Ebrahimi, Mir Behrad Khamess, M. Farid Golnaraghi, "Eddy current damper feasibility in automobile suspension: modeling, simulation and testing", Smart Materials and Structures, Vol. 18, No.1, 2009, 015017.

6) Jae-Sung Bae, Jai-Hyuk Hwang, Jung-Sam Park, and Dong-gi Kwag, " Modeling and Experiments on Eddy Current Damping caused by a Permanent Magnet in a Conductive Tube," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, 2009, pp. 3021-3035.

7) Kapjin Lee, Kyihwan Park, "EDDY

CURRENTS MODELING WITH THE CONSIDERATION OF THE MAGNETIC REYNOLDS NUMBER", ISIE, Vol.1, 2001, pp.678~683.

8) Henry A. Sodano, Jae-Sung Bae, Daniel J.Inman, W.Keith Belvin, "Concept and model of eddy current damper for vibration suppression of a beam", Journal of Sound and Vibration, Vol.288, 2005, pp.1177~1196.

9) Jae-Sung Bae, Moon K. Kwak, Daniel J. Inman, "Vibration suppression of a cantilever beam using eddy current damper", Journal of Sound and Vibration, Vol.284, 2005, pp.805~824.

10) 김종혁, 배재성, 황재혁, “자기효과 감쇠를 갖는 TMD를 이용한 외팔보의 수동형 진동제어에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 455-456.

11) Cheng, D. K, "Field and Wave Electromagnetics", New York: Second Edition, 1989.