

대시포트형 MR유체 마운트의 설계 인자에 대한 실험적 고찰

박우철^{1*}, 김일겸², 이현창¹
¹강원대학교 공학대학 기계자동차공학부
²강남필터(주), 인하공업전문대학 기계과

An Experimental Study on the Design Parameters of the Dashpot type MR fluid mount

Woo-Cheul Park^{1*}, Il-Gyoun Kim² and Hyun-Chang Lee¹

¹School of mechanical and automotive, Kangwon National University

²Kangnam Filter(Ltd.), Dept. of Mechanical Engineering, Inha technology college

요약 본 연구에서는 MR유체를 특징으로 하는 대시포트형 마운트를 제안하고, 자극 형상 및 구조의 변화가 MR 유체 마운트의 감쇠력에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 자극의 유효길이와 코어 중심부의 구조를 달리하여 MR 유체 마운트를 제작하였다. MR유체 마운트에 자기장을 형성하기 위하여 공급하는 전류의 세기를 변화시켰을 때의 감쇠력 변화와 전류를 공급하지 않은 경우의 감쇠력 변화를 측정하였다. 또한, 가진 변위는 일정하게 유지한 상태에서 MR엔진마운트에 가해지는 가진 주파수를 변화시켜 감쇠력의 변화를 측정하였다. MR유체마운트로부터 전달되는 힘은 가진 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 공급하는 전류의 세기가 증가함에 따라 전달되는 힘은 증가하여 나타났다. 자기장이 형성되는 MR마운트에 유효길이가 변화에 대해서는 전달력의 변화가 나타나지 않았다.

Abstract This research proposed a dashpot type mount design using MR fluids, and investigated experimentally the influence of the design parameters of the dashpot MR fluid mount, which affect the damping forces of the dashpot MR fluid mount. In order to observe the influence, the dashpot MR fluid mount which have the different effective length and the core structure is manufactured. The variations of the resistance forces according to different effective lengths of the magnetic pole of MR fluid mount, along which magnetic field is defined, was investigated. It was founded that the resistance forces from the MR mount decreased with increased input frequencies, while increased with increased applied electric current intensities. Nevertheless, there is no appreciable change in the resistance forces with respect to the effective length variations of the magnetic pole of MR fluid mount.

Key Words : Magnetic pole, Magnetorheological(MR) fluid, Dashpot, Effective length, transmitted force

1. 서론

기계, 항공, 건축, 토목 등 각종 분야의 구조물 및 시스템에서 발생하는 소음/진동을 효과적으로 차단시키기 위한 연구가 끊임없이 진행되어 왔다. 진동을 억제하기 위한 제어장치는 수동형, 능동형, 그리고 반능동형으로 구분된다. 능동형 제어장치는 우수한 제어성능에도 불구하고 큰 동력, 복잡한 구조, 고비용 등의 문제로 인해 상용

화에 어려움을 겪고 있다. 이에 반해 구조가 간단하고 저비용으로 구현할 수 있는 반능동 제어장치에 대한 관심이 최근 높아지고 있다. 특히 지능 재료중의 하나인 MR 유체를 이용한 반능동 제어장치는 큰 동력없이 감쇠력을 효과적으로 조절함으로써 능동형 제어장치에 가까운 성능을 발휘할 수 있다. 이러한 현실적인 이점으로 인해 충격흡수장치[1], 진동절연장치[2], 브레이크[3], 및 클러치 등에 대한 다양한 응용 연구가 활발히 진행되고 있으며,

*교신저자 : 박우철(wchpark@kangwon.ac.kr)

접수일 09년 10월 10일

수정일 09년 11월 13일

게재확정일 09년 12월 16일

MR유체를 이용한 응용장치의 모델링 및 설계에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이러한 선행된 연구를 살펴보면 다음과 같다.

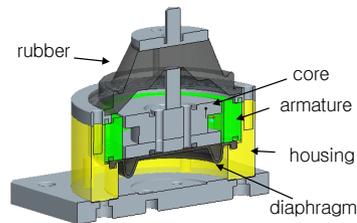
MR유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위해서 MR 유체 응용장치의 자기회로 설계가 매우 중요하다. 일반적으로 MR유체의 자기장에 대한 응답시간은 수 msec로 빠른 편이지만, MR유체를 사용한 응용 장치의 응답속도는 유체의 응답속도에 비하여 상대적으로 느린 편이다. 이는 MR유체와 강자성체로 구성된 자기회로의 전자기적 특성과 크게 관련이 있다. Wereley는 유한요소법을 이용한 분석적인 최적화 설계기법을 제안하였다. 이러한 최적설계는 제한된 응용장치의 크기에 대해서 자기회로가 최대 자속밀도 분포를 갖도록 이루어 졌다. 이는 자기회로의 영구적 포화와 병목현상을 무시하고, 일정한 자속 밀도가 자기 회로 내에 발생한다는 가정을 통하여 해석하였다 [4]. 또한, MR유체를 응용한 밸브 시스템의 자기회로 내부의 자속밀도 포화방지와 밸브의 무게를 최소화하기 위하여 유한요소법을 통해 밸브의 치수에 대한 최적화를 수행한 연구도 있다[5]. 그러나 이들 연구들은 자기회로의 설계 변수를 해석적으로 제시하는데 한계를 갖는다. MR유체를 응용한 댐퍼 시스템의 강자성체와 MR 유체의 비선형 전자기적 특성을 MR 유체의 비뉴턴 거동을 결합하여 해석을 수행하여 댐퍼의 전력소비를 최소화하고 응답속도를 향상시키기 위해 전자기적 설계를 수행하기도 하였으며[6], MR유체를 응용한 브레이크 시스템의 응답시간을 향상시키고 비선형 입출력 특성을 개선하기 위해 강자성체와 MR유체의 자화특성 및 자기회로의 전자기적 특성을 고려한 설계 방법을 제시한 연구도 수행되었다[3]. MR유체 응용장치의 자기회로의 특성을 파악하기 위하여 많은 연구자들이 유한요소법을 이용하여 해석하고 있으나, 계산이 복잡하고 고가의 소프트웨어를 이용해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 응용장치를 단순한 자기 등가회로로 구성하여 자기회로의 특성을 구하고, 이를 유한요소법과 비교한 연구도 수행되었으며, 자기 등가회로에 의한 계산 결과가 유한요소법에 의한 결과와 크게 차이 나지 않음을 밝혔다[7,8]. 이들 연구결과는 MR유체 응용장치의 자기회로 설계에 있어 유용한 관점들을 제시하고 있다. 그러나 수치적인 연구결과만 제시되었을 뿐이며, 실제 응용장치의 적용한 성능 평가의 결과는 없다.

따라서 본 연구에서는 MR유체가 적용된 대시포트형 마운트를 제안하고, 마운트 시스템의 설계인자의 변화가 시스템의 특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고자 한다. MR 유체 마운트 자기회로의 주요 인자인 자극의 유효길이와 자극의 구조를 달리하여 코어부를 설계·제작

하여, 부하되는 자기장의 변화에 대한 MR효과에 의한 저항력을 측정하여 자극의 유효길이가 변화 및 자극 구조의 변화가 미치는 영향에 살펴보았다. 이러한 결과들은 MR 유체 응용장치의 응용범위를 확장하기 위한 기초적 설계 자료로서 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

2. 대시포트형 MR유체 마운트

본 연구에서 제안된 MR 유체를 이용한 대시포트형 마운트의 대략적인 구조는 그림 1에 도시하였다[7]. 마운트 상부는 기본 강성과 댐핑력을 유지하기 위해서 주 고무 부분(main rubber)로 구성되어 있으며, 수직방향의 정적 하중을 지지하는 스프링 역할을 한다. 또한 상부에 공기 층과 유실이 공존하게 구성하여 MR유체의 충진여부의 문제에 대한 영향을 제거하였다. 하부는 부하질량을 지지할 수 있는 강재로 제작된 하우징과 다이어프램(diaphragm)으로 구성되어 있다. 다이어프램에 의하여 형성된 하부유실은 주로 유체를 저장하는 기능을 한다.



[그림 1] MR 마운트의 개략적 구조도

마운트의 상·하부 유실에는 MR 유체가 봉입되어 있으며, 실린더 모양의 자극(Magnetic pole)은 상부의 고무부에 연결되어 유실의 중간에 위치하게 된다. MR 유체에 자기장을 형성하는 간극은 원통 모양의 평판으로 일정한 간격을 가지며, 솔레노이드에 의해 코어부와 접극자에 의한 원통의 원주를 따라 일정한 자기장을 발생한다. 외부 가진 입력에 의하여 상부의 고무부의 변형과 함께 자극(Magnetic pole)이 가진 입력과 같은 방향으로 거동을 한다. 자극의 움직임과 유체의 접촉에 의하여 댐핑력이 발생하게 된다. 솔레노이드에 전류를 공급하면 코어와 접극자 사이에 형성된 간극 사이에 자기장이 형성되며, 이 자기장의 세기에 따라 MR 유체의 항복응력이 증가하여 마운트의 강성과 댐핑을 증가시킬 수 있다.

그림 1에 나타난 MR유체를 이용한 마운트에 대한 동적지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} = -k_v(x(t) - y(t)) - c_v(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) - F_{MR} \quad (1)$$

제안된 대시포트형 MR 유체 마운트에서 MR 유체에 의해 발생하는 힘 F_{MR} 은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} F_{MR} &= R_f \cdot (\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + P_{MR} \quad (2) \\ &= \frac{\pi d L}{h} \cdot (\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + 2 \frac{c L_p}{h} \tau_y(H) \end{aligned}$$

여기서 η 는 자기장 무부하시 MR유체의 점성계수, d 는 코어의 외경이며, L 은 유로의 길이, h 는 코어와 접극자 사이에 만들어지는 유로의 간격이며, 또한 자극의 간극을 의미한다. τ_y 는 부하된 자기장에 의하여 발생된 항복응력이며, H 는 자기장에 의하여 발생된 자기장의 세기(magnetic field intensity)이다. L_p 는 자극의 유효길이이다.

제안된 대시포트형 MR유체 마운트에서 성능에 영향을 미치는 부분은 식(1)과 식(2)에 나타난 바와 같이 F_{MR} 의 향으로 표현되는 부분이다. 코어의 길이 즉 유로의 길이 L 을 증가시키면 유체저항 R_f 가 증가하게 되며, 자극의 길이 L_p 를 증가시키면, 자속에 노출되는 MR 유체의 양이 증가하게 되어 자기장에 의한 항복응력의 변화에 따른 저항력 P_{MR} 이 증가하게 될 것이다. 그러나 MR 유체 마운트의 전체적인 크기의 제한 조건을 고려하여 설계를 할 때는 적절한 유로의 길이와 자극의 길이에 대한 상관관계를 고려하여야만 한다.

3. 실험장치 및 실험방법

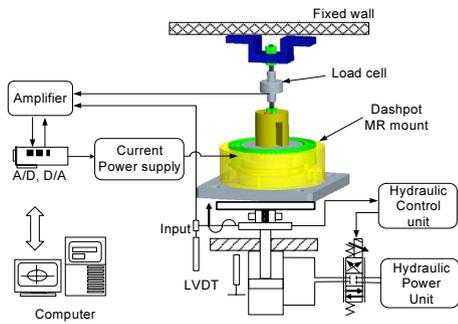
그림 2는 본 연구에서 제안한 대시포트 MR유체 마운트에서 자극의 형상이 MR유체 마운트의 감쇠력에 미치는 영향을 관찰하기 위한 코어부와 접극자의 사진이다. 주요 제원은 수치적 해석에서 사용한 제원과 동일하게 제작하였다[8]. 대시포트형 MR유체 마운트의 자극형상에 대한 영향을 관찰하기 위한 실험이기 때문에 마운트 상부에서 정하중을 지지하기 위한 고무부분은 제외시켰다. 하우징 내부에는 자극(Magnetic pole)이 존재한다. 전극을 만드는데 사용된 자극의 재질과 형상, 사용된 MR 유체의 특성을 고려하고, 최대 부하할 수 있는 전류를 1.5A로 가정하였을 때, 요구되는 감쇠력을 발생하는데 필요한 자기장을 형성하는데 필요한 적절한 솔레노이드

의 최소 권수 96회로 계산되었다. 본 연구에서는 솔레노이드의 권수를 100회로 하였다. 자기장이 형성되는 유효길이 L_p 를 10mm, 12mm, 14mm의 3가지로 달리 하여 제작하였다. 이렇게 만들어진 MR유체 마운트는 자기장 무부하시에는 유체의 점성에 의해서만 가진에 의한 힘이 전달되지만, 전류를 공급하게 되면 자기장이 발생하여 MR유체 효과에 의한 유체의 저항력이 증가하여 전달되어 지는 힘은 증가하게 된다.

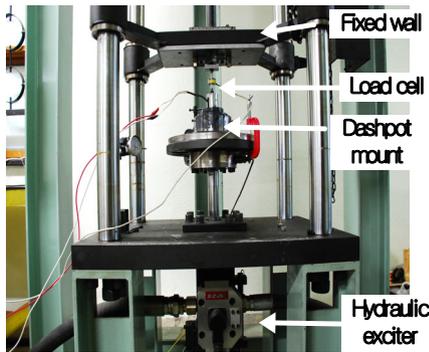


[그림 2] 대시포트 마운트 구성품과 자극

대시포트에서 발생하는 저항력을 측정하기 위하여 그림 3과 같이 실험장치를 구성하였다. MR 마운트의 솔레노이드에 자기장을 인가하기 위한 전류 증폭기(LORD사, RD - 3002 - 03)를 사용하였다. 전달되는 힘을 측정하기 위하여 로드셀(봉신로드셀, CDFS-30)을 사용하였다. 로드 셀에서 발생된 신호를 AD 변환기(PICO, ADC216)를 통하여 신호변환을 거쳐 컴퓨터 기억장치에 저장하였다. 또한, 함수 발생기(HP)를 이용하여 유압제어장치에 가진 입력을 부하하였다. MR 마운트의 가진 조건화와 자기장 변화에 따른 감쇠력 변화를 관찰하기 위하여 실험 조건을 다음과 같이 설정하였다. 가진 변위는 0.5 mm, 1.0 mm로 하였고, 가진 주파수는 1Hz, 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz, 10 Hz로 하였다. 이와 같이 낮은 주파수 대역으로 실험조건을 부여한 이유는 본 연구에서 제안된 대시포트형 MR유체마운트는 상부에 있는 고무가 고주파수의 작은 변위로 인한 진동을 흡수하고, MR유체는 저주파의 큰 변위의 진동에 대하여 동작하도록 하는 기본개념을 갖기 때문이다. MR 유체에 부하하는 자기장 변화에 따른 감쇠력 변화를 관찰하기 위하여 공급하는 전류는 자기장이 없는 무부하시와 0.5A, 1A, 1.5 A, 2A로 하였다.



(a) 대시포트 MR 마운트 실험장치 구성도



(b) 실험장치 사진

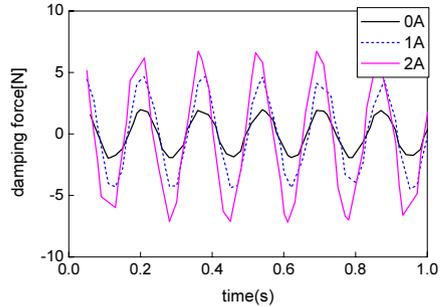
[그림 3] 대쉬 포트 MR 마운트 실험장치

4. MR유체 마운트의 성능 고찰

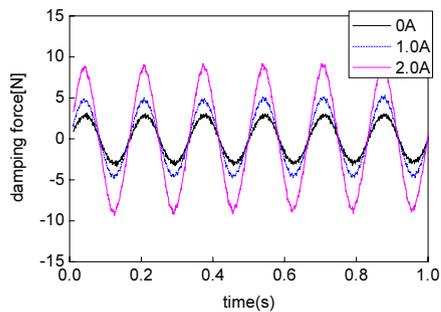
대시포트형 MR유체 마운트 안에 있는 자극(Magnetic pole)의 유효 길이가 달라졌을 때와 자극의 구조가 다를 때 나타나는 현상을 파악하기 위하여 자극의 유효길이는 10mm, 12mm, 14mm로 달리 하였으며, 자극의 구조는 일체형과 상자성체가 중간에 삽입되어 있는 분리형으로 달리하여 자극의 제작하였다. MR유체 마운트에 가해지는 가진 주파수는 1Hz, 2Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz, 10Hz로 변화시켰다. 가진 변위는 $\pm 0.5\text{mm}$ 로 하였다. 또한 MR 유체 마운트에 자기장을 형성하기 위하여 인가하는 전류의 세기를 전류를 공급하지 않은 경우와 0.5A, 1A, 1.5A 2A의 5가지로 변화시켜 가진에 의해 마운트를 통해 전달되는 힘의 변화를 측정하였다.

그림 4는 유효 길이가 12mm이고, MR 마운트에 가해지는 가진 주파수가 6Hz인 경우에 공급하는 전류의 변화에 따라 MR유체 마운트를 통하여 고정된 상부 벽면에 전달되는 힘을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 자기장을 형성하기 위하여 공급하는 전류의 세기가 증가

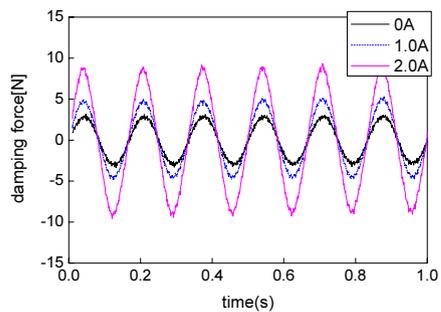
할수록 대시포트를 통해 전달되는 힘이 증가하여 나타나고 있다. 그러나 자기장이 형성되는 MR유체 마운트의 유효길이가 다른 경우에 대한 전달력의 변화는 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.



(a) 자극길이 10mm



(b) 자극길이 12mm



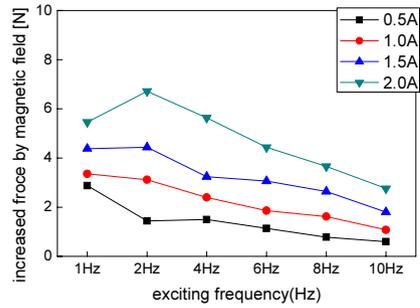
(c) 자극 길이 14mm

[그림 4] 자극유효 길이 변화에 따른 시간영역 응답

그림 5는 공급하는 전류에 의한 MR유체의 병행효과에 의해 나타나는 유체의 저항력의 변화를 도시한 것이다. 전류를 공급하여 자기장 세기를 변화시켜 이때 로드셀에 전달되는 힘의 변화를 측정하고, 전류를 공급하지

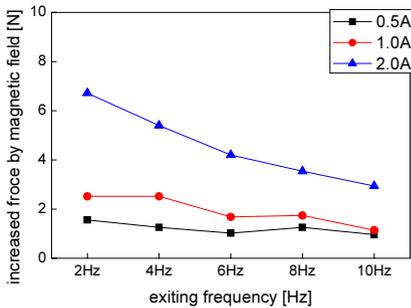
않은 상태 즉 뉴토니안 상태에서 전달되는 힘의 크기를 제거하면 자기장 변화에 의해 발생하는 빙행효과에 의한 유체의 저항력 변화를 구할 수 있다.

그림에 나타난 바와 같이 자극 길이가 다른 경우에도 거의 유사한 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 1Hz의 가진 주파수에서 보다 2Hz의 가진 주파수에서 높은 힘의 크기를 나타낸 후, 가진 주파수가 증가함에 따라 대시포트를 통하여 전달되는 힘은 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 동일한 주파수내에서는 공급하는 전류의 세기가 증가할수록 전달되는 힘은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 가진 주파수가 증가할수록 MR유체에 접하는 코어의 이동속도가 빨라져, 유체의 전단력이 감소하기 때문이다. 이와 같이 유체에 가해지는 전단속도가 증가할수록 유체의 전단력이 감소하는 현상을 전단담화(shearing thinning)이라 한다. 그림 5에 나타난 바와 같이 가진 주파수가 증가함에 따라 대시포트를 통하여 전달되는 힘이 감소하는 현상은 MR유체의 전단담화(shear thinning) 현상 때문이라고 판단된다. 따라서 MR유체를 이용한 응용장치를 설계할 때는 일반적으로 표현되는 항복응력의 증가만을 나타내는 빙행 모델이 아닌 전단담화 현상을 표현할 수 있는 수식이 사용되어야 할 것으로 판단된다.

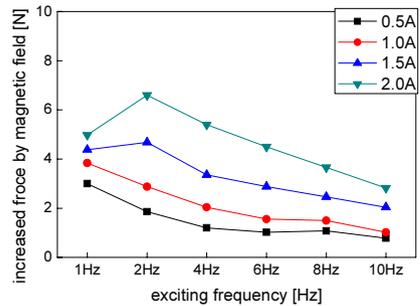


(c) 유효길이 14mm
[그림 5] 전달력 대 주파수 선도

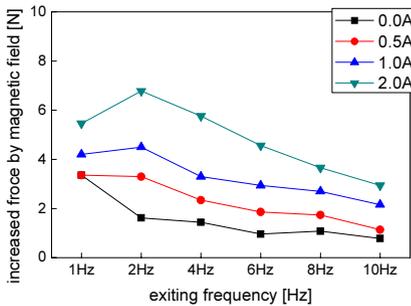
그림 6은 자극의 구조가 다른 경우에 대하여 대시포트를 통하여 전달되는 전달력을 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 자극의 구조가 다르다 하더라도 거의 유사한 경향과 힘의 크기를 나타내고 있다. 이와 같이 유사한 경향을 나타내는 이유는 코어 중심부에 삽입한 상자성체의 크기가 영향을 미칠 정도의 범위 내에 있지 않기 때문으로 생각된다[8]. 향후 상자성체의 삽입에 의해 형성되는 코어의 안쪽부분의 간극에 대한 연구를 수행할 계획이다.



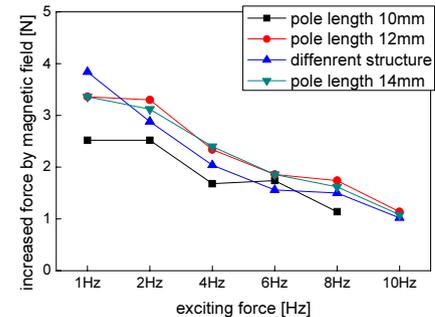
(a) 유효길이 10mm



[그림 6] 비자성체 삽입형의 전달력 선도(유효길이 12mm)



(b) 유효길이 12mm



[그림 7] 유효길이 변화에 따른 전달력 선도

그림 7은 자기장을 형성하기 위하여 대시포트에 1A의 전류를 공급한 경우의 MR효과에 의한 힘의 증가분을 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 자극의 구조가 다른 경우 그 차이에 의해 나타나는 MR효과 차이는 있지만, 구조 변화에 대하여 연관시킬 수 있는 일정한 관계를 나타내지는 않고 있다. 유로의 길이가 제한되어 있는 경우에 있어 자극의 길이나 구조가 MR유체의 MR효과에 대하여 미치는 영향은 미비하다고 할 수 있다. 따라서 MR 유체를 이용한 응용장치를 설계하는 경우, 유체의 점성에 의한 시스템의 저항력을 우선적으로 고려하여야 하며, 기본적으로 결정되어진 구조 내에서 제어구역에 맞는 최적의 자기구조를 갖도록 설계하여야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는, MR유체를 특징으로 하는 대시포트형 마운트를 제안하고, 자극 형상 및 구조의 변화가 MR 유체 마운트의 감쇠력에 미치는 영향에 대하여 고찰한 결과, 다음 각 호의 결론을 얻었다.

1. 대시포트형 MR유체 마운트로부터 전달되는 힘은 가진 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 공급하는 전류의 세기가 증가함에 따라 전달되는 힘은 증가하여 나타났다.
2. 자기장이 형성되는 MR유체 마운트의 유효길이 변화에 대해서는 전달력의 변화가 크게 나타나지 않았다.

향후, 유체의 전단담화 현상이 포함된 MR유체의 거동을 표현할 수 있는 관계식에 대한 연구와 본 연구에서 제안한 고무가 포함된 마운트의 고무부의 동특성과 MR효과와의 상관관계를 고려한 최적화 설계인자에 대한 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

[1] 남윤주, 김동욱, 박명관, 이육형, “바이패스형 MR 충격 댐퍼의 설계 및 성능 해석”, 대한기계학회 논문집 A권, 제30권, 제5호, pp.550~559, 2006.

[2] 박은천, 이성경, 이현재, 문석준, 정형조, 민경원, “대형 MR감쇠기가 설치된 건축구조물의 실시간 하이브리드 실험 및 준능동 알고리즘 적용”, 한국전산구조 공학회 논문집, 제 21권, 제5호, pp.465~474, 2008.10.

[3] Nam, Y. J., Moon, Y. J., Park, M. K., "Performance

Improvement of a Rotary MR Fluid Actuator Based On Electromagnetic Design," J. Intell. Mater. Syst. Struct. Onlinefirst, 10 July 2007, (doi:10.1177/1045389X07079463)

[4] Yoo, J. H. and Wereley, N. M., "Performance of a Magnetorheological Hydraulic Power Actuator System", J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 15, pp. 847~858, 2004.

[5] Li, W. H., Du, H. and Guo, N. Q., "Finite Element Analysis and Simulation Evaluation of a Magnetorheological Valve", Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol.21, pp.438~445, 2003.

[6] Gavin, H., Hoagg, J. and Dobossy, M., "Optimal Design of MR Dampers," Proc. U.S.-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions, Seattle, WA, pp.225~236, 2001.

[7] 박우철, 이현창, “대시포트형 MR유체 마운트의 자극설계에 관한 연구,” 한국산학기술학회논문지, 제10권, 제3호, pp.482~487, 2009.

[8] 하성훈, 성민상, 구오홍, 최승복, “MR댐퍼의 최적설계 : 이론적 방법 및 유한요소 방법,” 한국소음진동 공학회 2009년 춘계학술대회논문집, pp.581~586, 2009.

박 우 철(Woo-Cheul Park)

[정회원]



- 1987년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 강원대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

지능형 구조물, 시스템설계 및 정밀제어, 진동 및 소음제어, 친환경 기계설비

김 일 겸(II-Gyoum Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과 겸임교수
- 2004년 3월 ~ 현재 : 강남필터(주) 기업부설연구소 연구소장

<관심분야>

열유체시스템설계 및 제어, 실내공기질관련 설비, 산업기계설비

이 현 창(Hyun-Chang Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 5월 : Univ. of Maryland 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 5월 : Old Dominion Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

System ID, 시스템 설계, 진동 및 소음 제어, 구조해석, FEM