

## 대시포트형 MR유체 마운트의 자극설계에 관한 연구

박우철<sup>1\*</sup>, 이현창<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 기계자동차공학부

### Study on design of the magnetic pole used in the dashpot type MR fluid mount

Woo-Cheul Park<sup>1\*</sup> and Hyun-Chang Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical and Vehicle Engineering

**요 약** 본 연구에서는 MR 유체를 특징으로 하는 대시포트형 마운트를 제안하고, 제안된 MR유체 마운트의 동적지배방정식을 구하였다. 또한, 자극의 구조 및 형상과 관련된 설계인자의 변화가 솔레노이드에서의 자계 발생에 미치는 영향에 대하여 관찰하였다. 솔레노이드에서 발생하는 자기 특성에 대하여 살펴보기 위하여 자극의 유효길이가 코어 중심부의 구조를 달리하여 설계인자로 선정하였다. 등가자기회로법을 이용하여 솔레노이드에서의 자기 특성의 변화를 살펴보고, 이를 상용소프트웨어에 의한 계산 결과와 비교하였다. 등가자기회로법에 의한 계산 결과, 자극의 유효길이가 증가할수록 자기저항은 감소하여 자속밀도가 증가하는 경향을 나타내지만, 그 밖의 자기 특성의 변화는 작게 나타났다. 상용 소프트웨어를 이용한 결과와 등가자기회로에 의한 결과는 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다.

**Abstract** This research proposed a dashpot type mount design using MR fluids, and derived governing equation of the proposed design considering the design parameters of the mount and the Bingham characteristics of MR fluids, which affect the damping forces of the dashpot MR fluid mount. In order to observe the change of magnetic properties which occurs from the solenoid, the effective length of the magnetic pole and the structure of core are selected as design parameters. The magnetic field quality is calculated in compliance with an equivalent magnetic circuit method. When the effective length of pole increases, the magnetic resistance of the pole of the MR mount decreased, and the magnetic flux density is increased. The result which uses a commercial business software and the result in compliance with equivalent magnetic circuit method shows the tendency which is similar.

**Key Words** : Magnetic pole, Dashpot, MR fluid, Mount, Effective length, Magnetic flux

### 1. 서론

최근에는 유체의 물리적, 화학적 특성이 변화하는 이른바 기능성 유체(Smart Fluid) 혹은 제어성 유체가 연구되었으며, 이러한 기능성 유체 중 하나인 MR유체는 자기장에 의해 걸보기 점도가 변화하는 특성을 가진 유체이다[1]. 기능성 유체의 특성을 적용하여 구성된 응용장치는 단지 제어성 유체에 가해지는 포텐셜에 의하여 제어가 가능하므로, 제어에 필요한 서보 밸브나 모터 등과 같은 부가적인 복잡하고, 고가의 이동장치가 필요 없다. 따

라서 제어성 유체를 이용한 응용 장치는 연속적인 제어가 가능하고 설계가 간단하며, 유지가 용이하다. 또한 제작비용이 줄어들고, 반응속도가 빨라지는 장점이 있다. 이러한 장점들 때문에 자동차산업, 항공기 산업, 의료산업, 제조업, 방위산업, 기계산업 분야의 대형 건축물, 댐, 엔진마운트, 제진대 등 여러 분야에서 많은 연구가 수행되고 있다[2,3,4,5]. 그러나 이러한 MR유체를 이용한 장치의 연구는 제어기 설계 및 성능에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, MR유체의 성능에 가장 많은 영향을 미치는 자계의 발생에 대한 연구는 주로 모터를 개발하

\*교신저자: 박우철(wchpark@kangwon.ac.kr)

접수일 08년 12월 26일

수정일 09년 03월 13일

게재확정일 09년 03월 23일

는 과정에서 얻은 이론을 사용하며, 전문적으로 MR유체를 이용한 장치에 맞는 설계인자에 대한 연구는 거의 진무한 실정이다[6].

따라서 본 연구에서는 대시포트형 MR유체 마운트를 제안하고, MR유체를 이용한 장치를 개발하는데 적용되는 기본적인 설계인자인 자극의 유효길이 변화와 자극의 구조가 솔레노이드부의 자계 발생에 대하여 미치는 영향에 대하여 관찰하였다.

## 2. 대시포트형 MR유체마운트

### 2.1 구조 및 특징

MR유체는 공급하는 자기장에 의하여 항복응력이 변하여 유체의 저항력이나 이동물체의 운동에 대한 저항력을 이용하는 유체이므로, MR유체를 이용한 장치에는 기본적으로 코일을 감은 솔레노이드 형태를 갖는 것이 일반적이다[7].

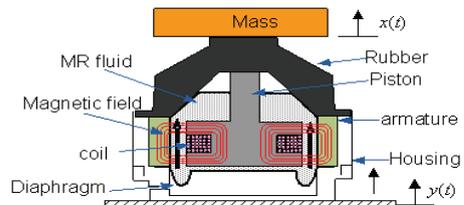
본 연구에서 제안된 MR 유체를 이용한 대시포트형 마운트의 대략적인 구조는 그림 1에 도시하였다. 마운트 상부는 기본 강성과 댐핑력을 유지하기 위해서 주고무(main rubber)로 구성되어 있으며, 수직방향의 정적하중을 지지하는 스프링 역할을 한다. 하부는 부하질량을 지지할 수 있는 강재로 제작된 하우징과 다이어프램으로 구성되어 있다. 고무부에 의해 형성된 마운트의 내부 공간에는 MR 유체가 채워져 있으며, 실린더 모양의 자극(Magnetic pole)은 상부의 고무부에 연결되어 유실의 중간에 위치하게 된다. MR 유체에 자기장을 형성하는 간극은 원통 모양의 평판으로 일정한 간격을 가지며, 솔레노이드에 의해 상부와 하부에 원통의 원주를 따라 일정한 자기장을 발생한다. 외부 가진 입력에 의하여 상부 챔버의 체적변화와 함께 자극이 가진 입력과 같은 방향으로 거동을 하게 되는데, 이때 유체의 댐핑력이 발생한다. 솔레노이드에 전류를 공급하면 코어와 자속가이드 사이에 형성된 간극 사이에 자기장이 형성되며, 이 자기장의 세기에 따라 MR 유체의 항복응력이 증가하여 마운트의 댐핑력이 증가하게 된다.

지금까지 MR 유체를 이용한 많은 연구에서 제안된 마운트는 유동모드 형태로, 전극이 두 평판 형태로 고정되고 그 사이로 유체가 유동되게 된다. 이러한 유동형태의 마운트는 잠김 현상이 발생할 경우, 공진주파수 이후의 비교적 높은 주파수 영역에서 진동절연 성능의 악화가 발생하는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 마운트 내부에 자극이 잠길 정도의 MR유체를 채

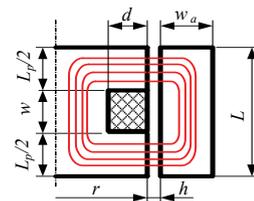
워, 상부에 공기층이 존재하게 하여 잠김 현상이 발생하였을 때 공기층이 이를 흡수할 수 있도록 하고, 상부의 고무부에 연결된 자극이 외력에 의해 움직임을 갖는 대시포트형 마운트를 제안하였다.

### 2.2 대시포트형 MR유체 마운트의 모델링

마운트의 설치 조건을 고려할 때 마운트에 작용하는 가진력은 대부분 수직 방향만으로 작용하므로 MR 마운트는 수직방향만을 고려하였다.



(a) 마운트의 구조



(b) MR마운트의 설계인자들

[그림 1] 대시포트형 MR유체 마운트의 개략적 구조

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

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

여기서  $m$ 은 MR유체 마운트에 의해 지지되는 질량이며,  $k_r$ 과  $c_r$ 은 각각 고무의 강성과 감쇠계수를 나타낸다.  $x(t)$ 는 질량의 변위,  $y(t)$ 는 기초부의 변위를 나타낸다.  $F_{MR}$ 은 MR 대시포트에 의해 발생하는 감쇠력을 나타내며, 유체저항과 자기장 부하에 따른 항복응력에 의한 감쇠력의 합으로 표현된다.

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

$$F_{MR} = R_f \cdot (\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + P_{MR} \quad (2)$$

$$= \frac{A\eta}{h} \cdot (\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + 2 \frac{cL_p}{h} \tau_y(H)$$

여기서  $\eta$ 는 자기장 무부하시 MR유체의 점성계수,  $A$ 는 코어의 외경에 의해 만들어지는 면적,  $h$ 는 코어와 접극자 사이에 만들어지는 유로의 간격이며, 또한 자극의 간극을 의미한다.  $\tau_y$ 는 부하된 자기장에 의하여 발생된 항복응력이며,  $H$ 는 자기장에 의하여 발생된 자기장의 세기(magnetic field intensity)이다.  $c$ 는 유체의 속도와 관계된 계수이며, 일반적으로 2에서 3사이의 값이 사용된다.  $L_p$ 는 자극의 길이이다.

제한된 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. 유로의 길이를 크게 할 경우에는 유체의 저항이 커져 매우 강한 느낌의 마운트가 되며, 전체 감쇠력에서 MR효과에 의한 감쇠력 부분의 비중이 매우 약하게 되며, 이것은 MR 유체를 이용하는 장점을 포기하는 것과 같은 의미가 될 것이다.

MR유체의 항복응력 변화에 따른 저항력을 높이기 위해서 자극의 유효길이를 크게 하는 것은 자기장을 형성하기 위한 코어부의 전체적인 자기회로에 영향을 미치게 된다. 즉 자속이 통과하는 면적, 자속 경로 변화에 따른 자기저항의 변화 등 솔레노이드부의 자기장 변화를 가져오게 되어 MR유체에 의한 저항력의 변화가 나타나게 될 것이다.

자극길이 변화에 따른 코어부의 자기구조의 변화를 이해함으로써 MR유체를 이용한 응용장치를 설계할 때 사용할 수 있는 기초자료를 확보하는 것은 반드시 필요한 사항이다.

그림 1(b)에 나타난 바와 같이 솔레노이드 형태로 만들어진 부분을 코어라고 하며, 이곳에 전류를 공급하여 자기장을 형성한다. MR유체가 접하는 부위에 일정한 간극을 두고 접극자(armature)를 설치하여 자속이 균일하게 형성되도록 유도한다. 연구에 인용된 MR유체는 Load사에서 제조한 MRF-132DG의 물성치를 사용하였다. 용매에

대한 입자의 중량비는 32%이며, 기본 점성계수는 0.2 Pas이다.

[표 1] 솔레노이드의 자기적 특성

component	Material	Relative permeability	Saturation Flux Density
Ferro-magnetic	S20C	2000	1.5Tesla
Para-magnetic	MC Plastic	1	-
Coil	Copper	1	-
MR fluid [9]	MRF-132D G	B-H Curve	B-H Curve
Air	-	1	-

유로의 길이가 제한된 조건하에서 자극길이의 변화가 전체 마운트의 감쇠력에 미치는 영향에 대하여 살펴보기 위하여 본 연구에서는 유로의 길이( $L$ )는 22mm, 코어의 반경( $r$ )은 35mm로 일정하게 유지하면서, 자극의 유효 길이( $L_p$ )를 10mm, 12mm, 14mm의 3가지로 다르게 하였으며, 또한 자기장의 손실에 대한 영향을 살펴보기 위하여 코어의 중심부를 상자성체로 한 경우와 일체형으로 한 경우 2가지로 다르게 하여 비교하였다. 또한 동일한 기자력을 발생시키기 위하여 코일의 권선수를 100으로 일정하게 하였는데, 동일한 직경의 코일을 사용하였기 때문에 일정한 권선수를 확보하기 위하여 코일이 차지하는 부위의 단면적을 변화시켰다. 계산에 사용된 각 재료의 물성치는 표 1과 같으며, 자극의 형상에 대한 자료는 표 2와 같다.

[표 2] 대시포트형 MR유체 마운트의 설계인자

Parameter	value
length of flow path ( $L$ )	22 mm
radius of core( $r$ )	35 mm
width of flow path( $b$ )	4835.6 mm <sup>2</sup>
gap( $h, l_g$ )	2 mm
width of armature( $w_a$ )	13 mm

자극의 유효길이와 구조의 변화에 대한 자기회로의 변화를 살펴보기 위한 설계인자의 조건은 표 3과 같다.

코어부의 형상에 따른 자기변화를 관찰하기 위하여 코어에 감은 권선수는 100회로 동일하게 하였으며, 권선에 공급하는 전류는 2A로 일정하다고 가정하였다. 따라서 제한된 마운트에서 발생하는 기자력  $\mathcal{F}$ 는 200 A-turns이 된다.

[표 3] 자기회로의 영향을 비교하기 위한 설계 인자

type	case1	case2	case3	case4
length of pole( $L_p$ )	10	12	14	12
coil length(w)	12	10	8	10
coil width(d)	8	9	10	9
hollow	×	×	×	○

### 3. 등가 자기회로에 의한 자기구조의 계산

전자기 장치의 동작을 등가 자기회로(equivalent magnetic circuit)를 사용하여 해석하는 것이 가능하다[8]. 이 기법을 사용하기에 앞서 단순화를 위한 몇 가지의 가정이 필요하다. 첫 번째 가정은 자속에 대하여 평균 경로(mean path)가 존재하며 이에 해당하는 평균 자속 밀도가 자기 구조의 단면적에 걸쳐 거의 일정하다는 것이다. 자기장의 세기는

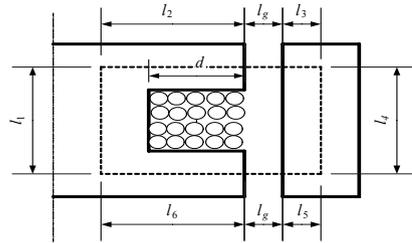
$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{\phi}{\mu A} \quad (3)$$

로부터 구할 수 있다. 코일의 기자력  $\mathcal{F}$ 를 자기장의 세기  $H$ 와 구조의 한 번에 대한 자기경로의 길이  $l$ 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\mathcal{F} = N \cdot i = H \cdot l \quad (4)$$

기자력  $\mathcal{F}$ 는 직렬 전기회로에서의 전압원과 유사하다. 여기서 자속  $\phi$ 는 직렬회로에서의 전류에 해당하며  $l/\mu A$ 는 자기회로의 한변의 자기저항에 해당한다.  $l/\mu A$ 은 자기저항(magnetic resistance, 또는 reluctance)  $R$ 로 정의된다. 전류  $i$ 가 흐르는 권선수  $N$ 인 코일이 코어 주위에 감겨 있을 때 코일에 의해 생성되는 기자력  $\mathcal{F}$ 는 자속  $\phi$ 를 발생시키는데 이 자속의 대부분은 코어 내에 집중되어 있고, 코어의 단면에 균일하다고 가정한다. 따라서 자기저항을 적용하면 자기저항은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (5)$$



[그림 2] 자기회로를 계산하기 위한 자기경로

자기가 통과하는 자기회로의 구조는 그림 2와 같으며 자기 경로는 다음과 같이 계산된다.

$$l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 + 2l_g \quad (6)$$

비투자율이 다르다고 한다면 코어 부분과 공극 그리고 접극자(armature)의 세부분으로 나누어져야 하며, 자기구조의 등가 자기 저항은

$$R_{eq} = R_{core} + R_{armature} + R_{gap} \quad (7)$$

이 되고, 자속  $\phi$ 는 기자력을 자기저항으로 나누어 주면 구할 수 있다. 즉

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{R_{eq}} \quad (8)$$

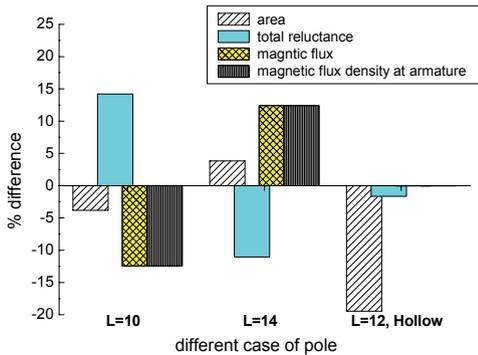
가 된다.

### 4. 결과 및 고찰

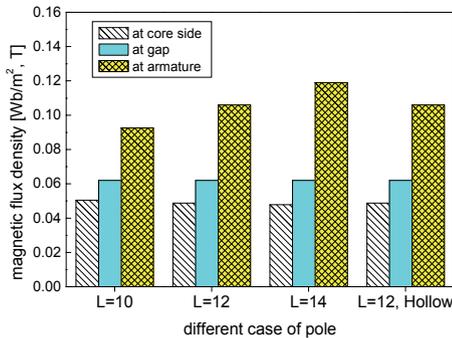
자극의 형상 변화가 자기와 관련된 변수들에 미치는 영향을 그림 3에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 자극의 유효길이가 증가할수록 자기의 흐름에 방해하는 성질인 자기저항은 감소하는 경향을 나타내고, 자기저항의 감소율과 비슷하게 자속의 크기와 접극자 부위의 자속밀도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 코어부의 중심에 상자성체를 넣어 코어를 만든 경우에는 자기가 통과하는 면적은 큰 비율로 감소하지만, 총등가자기저항 저항값은 상대적으로 작은 비율로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 자기가 통과하는 자극을 설계할 때 가장 중요하게 고려하여야 사항은 자극의 길이이며, 상이한 재질로 이중의 자극을 만들 필요는 없는 것으로

생각된다.

자극의 형상 변화에 따른 자기구조 내에서의 자속밀도의 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 자극의 길이가 증가함에 따라 자기구조 내에 형성되는 자속이 증가하는 것을 알 수 있으며, 코어 내부에 존재하는 상자성체의 유무에는 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 코어의 길이를 일정하게 유지한 상태에서 일정한 권선수를 확보하기 위하여 자극의 길이가 변함에 따라 그림 2에 나타난 권선부의 폭( $d$ )을 조절하였기 때문에 코어부에서는 자속이 통과하는 면적이 변하지만, 접극자는 동일한 크기로 하였기 때문에 면적의 변화가 나타나지 않기 때문이다. 또한, 자속이 통과하는 면적이 상대적으로 크기 때문에 자기포화 현상에 의한 영향이 나타나지 않기 때문이다. 덤퍼와 같이 크기가 제한된 공간 내에 작은 크기의 자극과 접극자를 설계하는 경우에는 자기포화에 의한 영향이 나타날 것으로 판단된다.



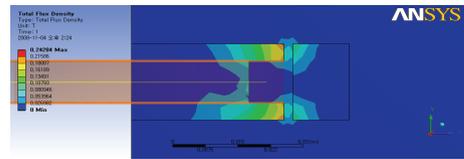
[그림 3] 코어형상의 변화에 따른 자기특성 변화의 백분율 비교



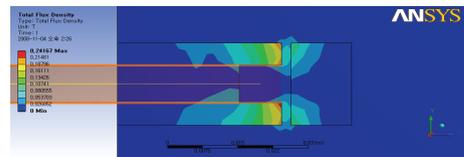
[그림 4] 코어형상의 차이에 의한 자기밀도의 변화

상용소프트웨어인 Ansys workbench의 자기장 해석 도

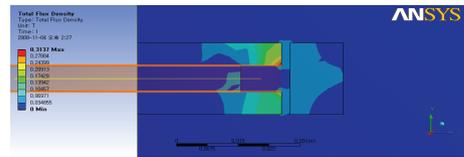
구를 이용하여 코어부에 발생하는 자기장의 특성을 해석하였다. 그림 5는 자속밀도에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 자기를 발생하는 코어에서는 자속밀도의 변화가 크게 나타나지 않고 있으며, 공극과 접하는 자극부에서는 자극 길이에 따른 면적 감소의 영향으로 이 감소함에 따라 자속밀도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 면적이 일정한 접극자에서는 자극 길이가 커짐에 따라 자기장이 형성되는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서의 개략적인 계산방법에 의한 결과인 그림 4와 유사한 경향을 나타내고 있다.



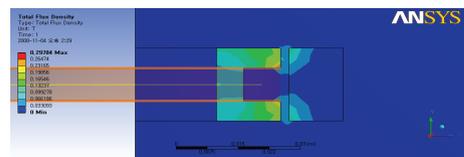
(a) case1



(b) case2



(c) case3



(d) case4

[그림 5] Ansys workbench에 의한 자속밀도 해석

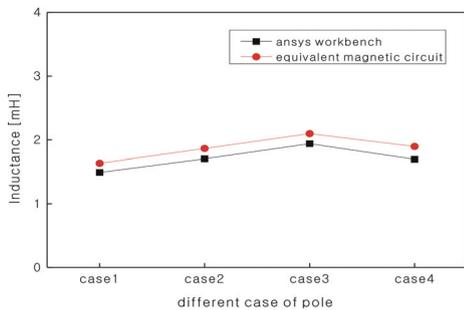
그림 6은 등가자기회로법을 이용하여 구한 인덕턴스와 Ansys workbench의 자기장 해석에 의해 구한 인덕턴스를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Ansys workbench에 의한 결과와 마찬가지로 등가 자기회로에 의해서 구한 인덕턴스의 값들도 자극의 유효길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 자극의 구조 변화에 대해서는 변화가 나타나지 않고 있다. 따라서 MR유체를 이용한 장치를 설계할 때, 가장 중요하게 생각하여야 할 부분은 자극의 유효길이라고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 MR유체를 이용한 장치를 개발하는데 적용되는 기본적인 설계인자인 자극의 유효길이 변화가 솔레노이드부의 자계 발생에 대하여 미치는 영향에 간단한 계산방법을 이용하여 관찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 자극의 유효길이 변화가 솔레노이드부의 자기적 특성 변화에는 약간의 영향을 미치지만, 코어의 구조가 다른 경우에도 자기장의 변화는 크게 나타나지 않았다.
- 2) 상용 해석프로그램을 사용하여 해석한 경우에도 동일한 결론은 얻었다.
- 3) 자기포화나 자기경로의 급격한 변화가 발생하지 않는 구조에서는 간단한 계산방법에 의해 자기부를 설계할 수 있음을 확인하였다.

향후 코일부의 면적을 일정하게 유지한 경우와 접극자의 두께의 영향 등 자기포화에 의한 영향에 대한 연구와 이를 바탕으로 엔진마운트의 고무부의 동특성과 MR효과와의 상관관계를 고려한 최적화 설계인자에 대한 후속 연구가 필요하다고 판단된다.



[그림 6] 해석방법에 따른 인덕턴스의 비교

## 참고문헌

[1] Carlson, J.D., Catanzarite, D.M. and St. Clair, K.A., "Commercial Magneto-rheological Fluid Devices", Proceedings of 5th International Conference on ER Fluids, MR suspension and Associated Technology, pp. 20-28, 1996.

[2] 하상훈, 최승복, 유원희, "MR 댐퍼를 적용한 철도차량의 안정성 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제18권 제7호, pp.732-740, 2008.

[3] Liao, W.H., and Wang, D.H., "Semiactive Vibration Control of Train Suspension Systems via Magnetorheological Dampers," Journal of Intelligent Material Structures and Systems, Vol.14, pp.161~172, 2003.

[4] Lee, Y., and Jeon, D., "A Study on the Vibration Attenuation of Driver Seat Using an MR Fluid Damper," Journal of Intelligent Material Structures and Systems, Vol. 13, pp. 437-441, 2002.

[5] Sims, N.D., Stanway, R., Johnson, A.R., and Mellor, P., "Design, Testing, and Model Validation of an MR Squeeze-Flow Vibration Damper," Proceeding of SPIE, Vol. 4331, pp. 111-120, 2001.

[6] 최승복, 홍성룡, Morman M. Wereley, "MR유체의 특성과 진동분야에 관한 응용연구 사례 및 연구동향", 소음-진동, 제15권 제1호, pp.9-19, 2005.

[7] The Nguyen, Constantin Ciocanel and Mohammad Elahinia, "Parameter Optimization in Designing an MR Mount", 15th International Congress on Sound and Vibration, pp. 315-322, 2008.

[8] Giorgio Rizzoni, "Principles and Applications of Electrical Engineering", McGraw-Hill Korea, pp. 897-898, 2006.

[9] <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf>

### 박 우 철(Woo-Cheul Park)

[정회원]



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

<관심분야>

지능형 구조물 및 시스템 설계 및 정밀 제어, 진동 및 소음 제어, 친환경기계설비

### 이 현 창(Hyun-Chang Lee)

[중신회원]



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

<관심분야>

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