MR 댐퍼를 이용한 반능동식 진동 제어

Semi-Active Vibration Control using an MR Damper

전 도 영, 박 찬 호, 유 정 열
(Do Young Jeon, Chan Ho Park and Jung Yul Yoo)

Abstract : For the semiactive vibration control, a variable damper and proper control systems are essential. In this research, a controllable damper was designed using the MR fluids and its mechanical properties such as damping constant and response time were measured. Since the response time of the MR damper was much longer than nominal MR fluid response time, the time delay of the damper should be considered in the design of controllers. It is shown that the advanced On/Off vibration control which includes the damper time delay performs more effectively than the conventional one.

Keywords : magneto-rheological fluid, variable damper, On/Off vibration control, semiactive vibration control

I. 서론

1960년대 중반에 미국과 유럽을 중심으로 자동차의 능동식 현가장치에 대한 많은 연구가 이루어졌고 1970년대 초에는 이를 바탕으로 반능동식 현가장치가 제안되면서 이에 대한 많은 연구가 이루어져 오고 있다[2][6][9][11]. 이는 기존의 수동식 진동 시스템이 고정된 특성으로 인해 변화되는 외란에 적절히 변화되지 못하는데 반해 반능동식 및 능동식 진동제어는 효율적인 진동감쇠를 가져올 수 있는 것이기 때문이었다. 특히 1980년대에 마이크로 프로세서의 발전으로 인하여 제어기의 구현이 용이해지면서 반능동식 및 능동식 진동제어를 이용한 시스템의 상용화가 가능하게 되었다. 반능동식 진동제어는 능동식 진동제어에 비해서 시스템의 부피가 작고 안정성이 보장되며 에너지가 적게 든다. 또한 실시간으로 제어할 경우에는 능동식 진동제어에 가까운 성능을 낼 수 있다고 알려져 있다[3][4][5].

반능동식 진동제어는 가변형 댐퍼가 사용되는데 감쇠력의 범위 및 응답속도가 성능의 주요한 관건이 된다. 스텝모터를 사용하여 댐퍼의 오리피스 크기를 변화시킴으로써 댐핑계수를 바꾸는 댐퍼의 경우 1-4Hz정도의 외란에 대한 진동제어는 가능하나 더 높은 주파수에서는 적절히 성능을 발휘 못하는 것으로 알려져 있다. 이에 반해 ER(Electro-Rheological)이나 MR(Magneto-Rheological) 유체를 이용한 댐퍼는 항복응력의 변화시간이 짧기 때문에 더 넓은 주파수의 진동 영역에서도 충분한 진동감쇠를 보일 수 있다[1][8][10].

MR 댐퍼에도 시간지연이 존재하는데 주원인으로는 MR 유체의 자기장에 의한 항복응력의 변화시간이나 자기장이 정상상태까지 도달되는 시간 등이 있다. 이러한 시간지연은 댐퍼 성능과 직결되며 실제 제어 알고리즘을 구현하는데 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 논문에서는 MR 유체를 이용하여 설계 및 제작된 댐퍼의 시간지연을 측정하였고 DSP보드를 이용하여 시간지연을 고려한 On/ Off 제어 알고리즘을 구현함으로써 MR 댐퍼의 진동전달성 및 여러 주파수에 대한 외란으로부터 진동감쇠의 극대화를 보였다.

접수일자 : 1997. 9. 4., 수정완료 : 1998. 1. 20.
전도영, 박찬호 : 서강대학교 기계공학과
유정열 : 서울대학교 기계공학과
※ 본 연구는 96년도 교육부 학술연구조성비 (기계공학 : ME96-B-04)에 의해 연구되었습니다.

본 논문의 2절에서는 MR 유체의 특성에 대해서 살펴보고 3절에서는 MR 댐퍼의 구조 및 시간지연이나 댐핑 특성 등을 파악한다. 4절에서는 MR 댐퍼의 시간지연을 고려하여 반능동식 진동제어의 일종인 On/Off 제어 알고리즘을 적용함으로써 MR 댐퍼의 성능이 극대화됨을 보인다.

II. MR (Magneto-Rheological) 유체의 특성

MR 유체는 작용하는 장이 없을 때에는 뉴턴 유체의 특징을 보이며 장이 작용할 때는 항복응력이 증가하는 빙햄 유체의 특성을 나타낸다. 빙햄 유체는 다음의 식과 같이 점성 μ와 전단 응력 변형률인 $\dot{\gamma}$에 의해 생기는 응력과 자기장에 대한 함수 형태로 나타나는 응력으로 (1)처럼 표현된다.

$$\tau = \tau(H) + \mu\dot{\gamma} \tag{1}$$

이러한 빙햄 유체의 특성을 그래프로 나타내면 그림 1과 같은데 기울기는 점성 μ가 되고 자기장의 세기 H가 증가함에 따라 y절편은 증가된다. 이처럼 MR 유체에 자기장이 작용할 때 항복응력이 증가하는 원인을 그림 2에 나타내었다. 자기장이 작용하지 않을 때는 그림 2의 (a)와 같이 등방성의 물리적 현상을 갖게 되다가 유체에 N극과 S극이 존재할 때 MR 유체는 자기 극성을 가지게 되어 그림 2의 (b)처럼 각각의 입자들이 이방성 구조의 쇠사슬 형태로 나열되며 작용하는 자기장의 세기가 강할수록 더욱 강한 힘으로 서로를 붙잡게 되며 이 사슬을 부수기 위한 힘이 항복응력이 된다.

이러한 MR 유체는 변화하는 장에 대한 반응속도가 빠른 특징이 있는데 대략적으로 자기장 변화에 대한 응답시간이 수 msec로 알려져 있기 때문에 실시간 제어가 가능하며 기계 시스템과 전자제어 상호간의 융합이 용이하다. 또한 생산 및 장치의 동작 시에 첨가될 수 있는 불순물의 영향이 없고 독성이 없어 어느 환경에서나 안전하여 모든 장치의 구성요소로 충분하다. MR 유체의 항복응력은 대략 50-100kPa이고 작동온도는 -40°C에서 150°C 정도이다. 일반적으로 자기장이 없는 상온에서 MR 유체의 점성은 0.2-0.3Pas이고 비중은 3-4정도이며 색깔은 검갈색이나 회색을 띈다. 이러한 특성으로 인하여 MR 유체는 댐퍼, 엔진 마운트, 클러치, 브레이크, 밸브, 헬기의 로터, 지진을 이겨내는 구조물, 운동기구 등 많은 곳에 응용될 수 있다.

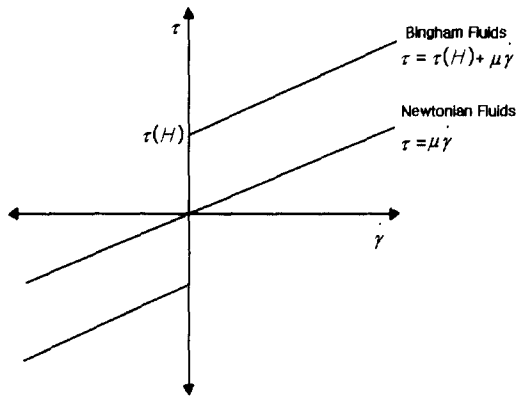


그림 1. 빙햄 유체의 특성.
Fig. 1. The property of bingham fluids.

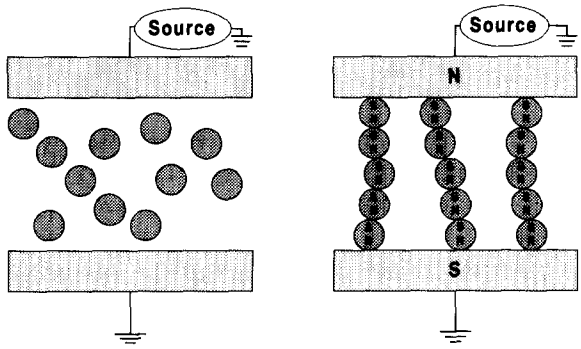


그림 2. MR 유체의 거동 : (a) 자기장이 없을 때, (b) 자기장이 있을 때.
Fig. 2. The behavior of MR fluids : (a) No magnetic fields applied, (b) Magnetic fields applied.

III. MR 댐퍼의 구조 및 특성

1. MR 댐퍼의 구조

본 연구에서 설계된 MR 댐퍼의 구조를 그림 3에 나타내었다. 댐퍼의 지름은 80mm이고 길이가 250mm이며 30mm의 스트로크를 가진다. 피스톤 헤드는 6개의 오리피스 구멍을 가지고 있으며 헤드안에는 공간이 있어 3개의 전자석이 들어가 오리피스를 통해 움직이는 MR 유체에 자기장을 가해준다. 피스톤 로드의 움직임에 의해서 실린더 내부 부피변화가 일어나게 되는데 이러한 부피변화를 수용하기 위하여 실린더 하부에는 유연한 다이아프램이 있다. 이러한 MR 댐퍼는 전자석에 입력되는 전류의 크기를 변화함에 따라 오리피스 구멍의 크기를 조절하는 역할을 하여 압력 손실 즉 댐핑상수를 바꾸게 된다.

2. MR 댐퍼의 특성

인장 실험기를 이용하여 댐퍼의 힘과 속도에 대한 물리적인 특성을 구한 결과는 그림 4와 같다. 인장 실험기에 댐퍼를 놓고 일정한 속도로 압축하면서 댐퍼의 실린더에 부착되어 있는 로드셀에 의해서 가해지는 힘이 측정된다. MR 댐퍼는 자기장의 변화에 따라 댐핑상수가 변하고 있는 특성을 나타내는데 자기장이 0mT일 때 힘과 속도의 그래프는 일반적인 댐퍼와 비슷한 특징을 나타낸다. 그러나 자기장의 세기가 증가하면서 유체의 항복응력은 커지고 댐핑상수인 기울기도 증가하며 MR 유체가 빙햄 유체의 특성을 띄는 것을 보여준다.

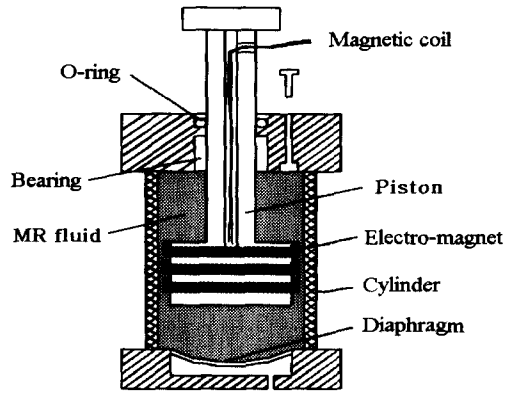


그림 3. MR 댐퍼의 구조.
Fig. 3. The structure of the MR damper.

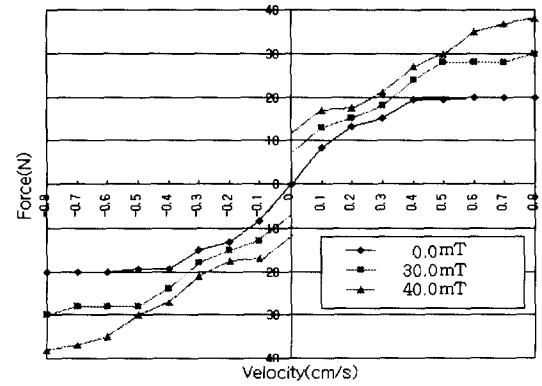


그림 4. MR 댐퍼의 특성.
Fig. 4. The property of the MR damper.

3. MR 댐퍼의 시간지연 측정

일반적으로 MR 유체는 자기장이 변화할 때 응답속도가 수내지 수십 msec정도라고 알려져 있다. MR 댐퍼의 경우 응답속도 또는 시간지연은 자기장의 스텝형태의 변화에 대해서 댐핑상수가 정상상태로 가는데 걸리는 시간을 의미하며 주원인은 자기장 발생장치나 MR 유체의 응답속도 때문이다.

MR 댐퍼의 시간지연을 측정하기 위한 장치도는 그림 5와 같다. MR 댐퍼를 등속도로 이동시키기 위하여 XY 테이블에 연결하고 그 사이에 로드셀을 장착하여 가해지는 힘을 측정한다. 이 실험 장치는 XY 테이블에 의해 댐퍼를 등속도로 압축 또는 인장시키면서 자기장을 스텝형태로 최소 0 mT에서 최대 37.0mT를 주거나 또는 반대로 하여 로드셀에 의해 댐퍼에 걸리는 힘이 정상상태에 도달하기까지 걸리는 시간을 구한다.

그림 6은 10, 15, 20mm/s의 등속도에 대해 각각 자기장을 가할 때와 가하지 않을 때의 응답속도를 나타낸 것으로 데이터 획득 샘플링 간격을 1msec로 하였다. 이때 자기장을 on/off 하는 회로의 응답속도는 0.2msec이하로 무시할 수 있다. 댐핑력의 오버슈트 시점의 90%를 MR 댐퍼의 시간지연으로 정의하여 구한 결과 그림에서 보는 바와 같이 32-40msec임을 알 수 있다. 그림에서 비교되듯이 댐퍼의 압축속도가 바뀌더라도 시간지연은 비슷하다. 또한 댐핑상수가 on이 될 때와 off가 될 때에도 비슷한 결과를 보인다. 따라서 이 댐퍼를 제어하기 위해서는 시간지연을 32-40msec로 고려해야 한다.

이러한 MR 댐퍼의 시간지연은 설계방법에 따라 달라진다. 유체에 가해지는 자기장의 방향, 자기장 밀도의 균일함

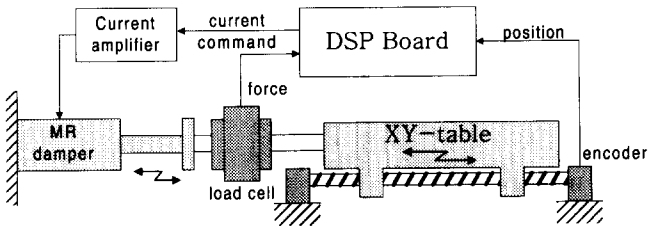
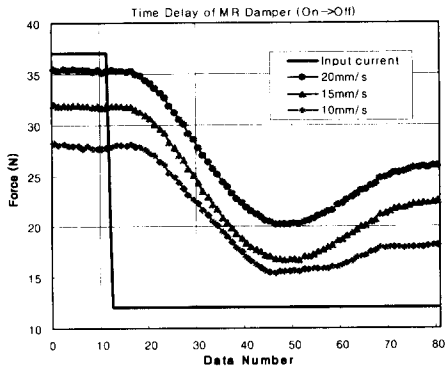
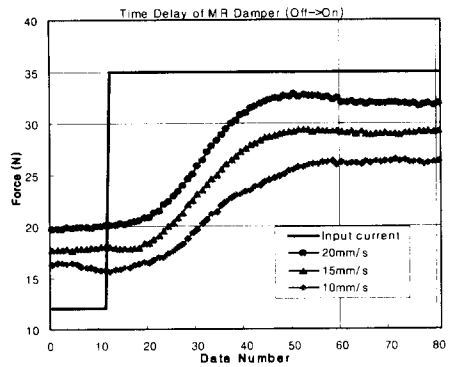


그림 5. MR 댐퍼의 시간지연 측정 장치도.
Fig. 5. The experimental setup for the response time measurement of the MR damper.



(a)



(b)

그림 6. MR 댐퍼의 응답속도 : (a) on에서 off일 때 시간지연, (b) off에서 on일 때 시간지연.
Fig. 6. The response time of the MR damper : (a) Time delay from on to off, (b) Time delay from off to on.

의 여부, 자기장을 만드는 코어의 유무 등 설계방법의 여러 가지 요인에 의해서 MR 댐퍼의 시간지연은 바뀔 수 있기 때문에 최적의 설계방법이 고려되어야 한다.

IV. MR 댐퍼를 이용한 반능동식 진동 제어

1. 시간지연을 고려한 On/Off 제어 알고리즘

그림 7과 같은 2자유도를 갖는 질량 스프링 댐퍼 시스템에서 진동제어는 질량 m에 가해지는 외란에 대해 질량 M의 위치 변화를 최소화하는 것을 목표로 한다. 자동차의 현가장치의 경우 질량 M은 차체의 질량, 질량 m은 차축의 질량을 뜻하며 가변형 댐퍼의 제어 즉 반능동식 현가장치 시스템을 의미한다. 그림에 보여진 2자유도 시스템은 방진 테이블, 엔진 마운트 등 대부분의 진동제어 시스템의 일반적인 모델이라 가정한다.

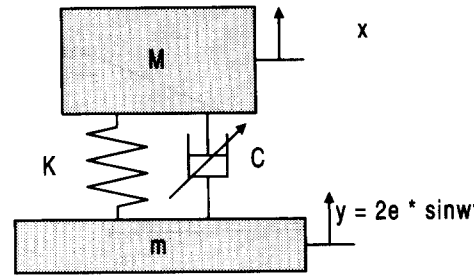


그림 7. 2 자유도를 가지는 질량 스프링 댐퍼 시스템.
Fig. 7. m-c-k system with a two degree of freedom.

일반적으로 sky-hook방법을 변형한 여러 형태의 반능동식 제어 알고리즘이 제안되고 있는데 본 연구에서는 질량 M의 절대속도와 질량 M과 m의 상대속도를 통하여 댐핑상수를 최대 또는 최소화하는 다음과 같은 반능동식 진동 제어 알고리즘을 적용한다. On/Off 제어 알고리즘은 다음 (2)와 같이 표현될 수 있다[5][7][11].

$$\begin{aligned} C &= C_{max} \quad when \quad \dot{x}(\dot{x}-\dot{y}) \geq 0 \\ C &= C_{min} \quad when \quad \dot{x}(\dot{x}-\dot{y}) < 0 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 C는 댐핑상수, $\dot{x}$은 질량 M의 절대속도이고 $(\dot{x}-\dot{y})$는 질량 M과 m의 상대속도를 의미한다. 그러나 실제로 위의 (2)와 같은 On/Off 제어 알고리즘에 MR 댐퍼의 시간지연을 고려하지 않을 경우 모든 주파수 영역에서 저성능을 가져오므로 시간지연을 고려하여 기존의 On/Off 제어 알고리즘을 수정해야 한다.

그림 8은 시간지연을 고려한 On/Off 제어 알고리즘에 대한 설명을 나타낸 것이다. 이 신호가 양수인 BD구간에서는 댐핑이 on이 되어야 하고 음수인 DF구간에서는 off가 되어야 한다. 이처럼 MR 댐퍼의 시간지연이 없을 경우에는 B와 D점에서 각각 on과 off상태를 지속해주면 되지만 시간지연 d를 고려할 경우에는 A와 C점에서 미리 on/off를 해야 한다. A점과 C점을 알아내는 방법은 다음과 같다. 신호의 미분치와 부호의 변화로 B점과 D점이 측정되면 MR 댐퍼의 시간지연 d만큼을 빼서 A점과 C점을 예측하여 다음 주기인 E와 G점에서 각각 on/off하게 된다. 결국 제어기는 AD구간을 정보로 사용해서 다음 주기인 EG구간에서 on/off하는데 이와 같은 방법은 그림 9에서와 같이 신호의 주기는 질량 M의 절대속도 주기의 0.5배가 되기 때문에 한 주기의 신호를 정보로 사용하면 댐퍼에 가해지는 임의의 진동 y에 대해서 반 주기만에 제어기는 출력값을 내보낸다. 즉 일정량 반복되는 하나내지 두 개의 성분을 가지는 진동에 대해서 반주기만에 진동감소의 영향을 주게 된다.

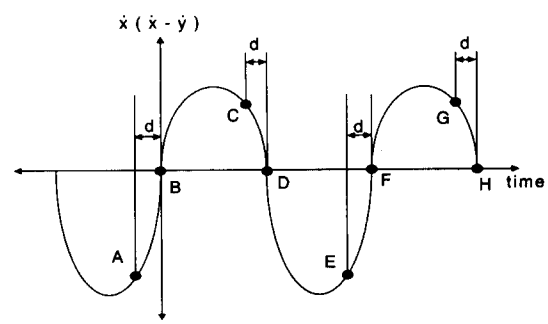


그림 8. 시간지연이 고려된 On/Off 제어 알고리즘의 개념.
Fig. 8. The concept of the advanced On/Off control algorithm.

그림 9는 앞에서 언급한 바와 같이 시간지연이 고려된 On/Off 제어 알고리즘이 가해지는 진동에 대해서 반주기만에 진동감소를 보이는 이유를 설명한 것이다. 질량 M의 절대속도와 질량 M과 m의 상대속도는 위상차 a를 가지는데 이 두신호를 곱한 신호는 댐핑을 on/off하는 조건이 된다. 질량 M의 절대 속도와 질량 M과 m의 상대속도를 각각 $x\sin(wt)$, $y\sin(wt+a)$라고 할 때 두 신호의 곱은 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} & x\sin(wt)\times y\sin(wt+a) \\ &= A\sin^2 wt + B\sin wt\cos wt \\ &= a\sin(2wt+a')+\frac{A}{2} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $a=\sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2+\left(\frac{B}{2}\right)^2}$, $A=xy\cos a$,

$B=xy\sin a$, $a'=\tan^{-1}\frac{A}{B}$

이며 따라서 (3)에 의해서 두 신호를 곱한 신호의 주기는 질량 M의 절대속도의 0.5배가 되는데 이러한 이유로 지속적으로 한두개 성분의 주파수를 가지는 진동에 대해서 반주기만에 진동을 감소시킨다. 이처럼 시간지연이 고려된 On/Off 제어기는 엔진 마운트나 기계류의 방진 시스템같이 외란의 주기가 비교적 일정한 구간이 많은 시스템에 응용가능하다.

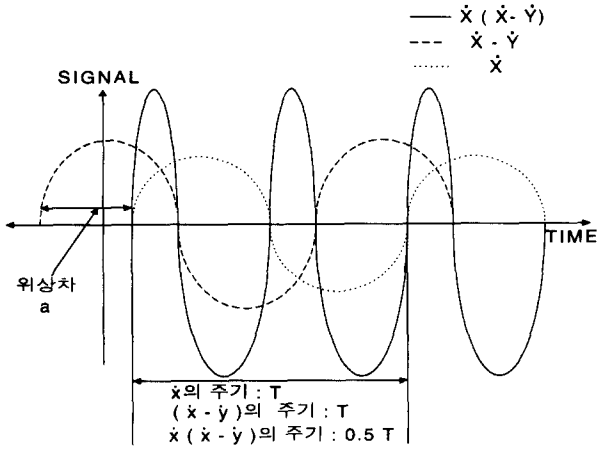


그림 9. $\dot{x}(\dot{x}-\dot{y})$ 신호의 주기.
Fig. 9. The frequency of signal $\dot{x}(\dot{x}-\dot{y})$.

2. 진동 제어 실험 장치

그림 10은 On/Off 제어 알고리즘의 구현 및 MR 댐퍼의 성능 실험을 위한 실험 장치도이다. MR 댐퍼에 진동을 가하기 위해서 서보모터에 캠 시스템을 장착하였다. LVDT를 사용하여 댐퍼의 질량 M의 절대 위치와 질량 M과 m의 상대 위치를 측정하고 이 신호를 DSP 보드로 보내어진다. 이 센서 신호의 노이즈를 없애기 위해서 저역 필터를 사용하고 Euler 방법을 이용하여 미분을 취함으로써 On/Off 제어 알고리즘을 구현하였다. 제어기에 의해 D/A로 나오는 출력은 전류 증폭기에 의해 댐퍼의 댐핑상수를 변화시킨다. On/Off 제어 알고리즘에서 off상태일 때는 0 mT가 on일 때는 37.0 mT의 자기장이 발생된다.

3. 주파수 영역에서 MR 댐퍼의 성질

그림 11은 각각의 주파수에 해당하는 진동이 질량 m에 가해질 때 MR 댐퍼에 일정량의 자기장을 발생시켜 질량 M의 변위를 질량 m의 것으로 나누어 구한 진동전달성이

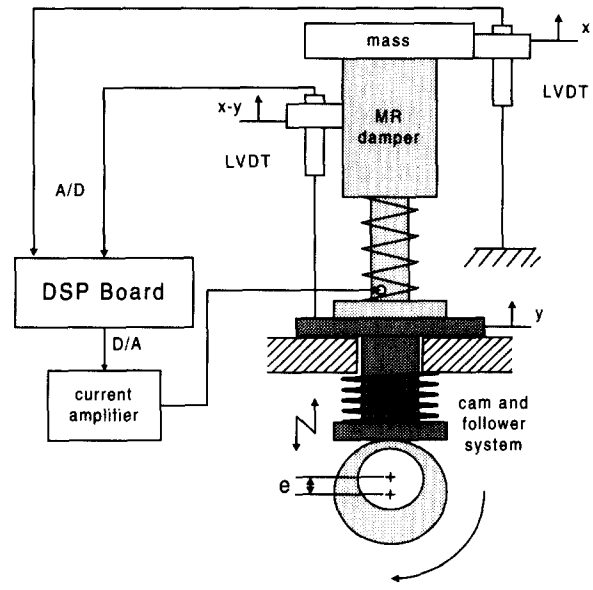


그림 10. On/Off 제어 알고리즘 구현을 위한 실험 장치도.
Fig. 10. The experimental setup for the On/Off control experiments.

다. 이 댐퍼 시스템의 공명점은 대략 4Hz이며 전류가 가해지면서 MR 유체에 의해 댐퍼의 강성과 댐핑이 커짐을 알 수 있다. 또한 댐핑상수에 상관없이 한곳에서 만나는 점은 진동전달성이 1인 지점으로서 이곳의 주파수는 대략 5.4Hz이며 이는 공명점의 대략 1.414배가 되는 지점에 해당된다.

4. 실험 결과

시간지연이 고려된 On/Off 제어 알고리즘을 적용하여 댐퍼의 진동전달성을 구한 결과는 그림 12와 같다. 직관적인 제어 방법중의 하나는 진동의 주파수에 따라 댐핑상수를 변화시키는 것이다. 즉 진동 주파수가 5.4Hz보다 적을 경우 입력전류를 최대로 하여 댐핑상수를 크게 하고 5.4Hz보다 큰 진동 주파수일 경우 입력전류를 최소화함으로써 진동전달성을 최소화할 수 있는데 이러한 방법을 적응식 댐핑제어라고 한다. 이와 비교할 때 시간지연을 고려한 On/Off 제어 알고리즘은 6Hz이하에서 적응식 댐핑제어보다 좋은 결과를 보이고 6Hz이상에서는 off상태와 거의 같다. 특히 4.5Hz에서 5.5Hz사이에서는 On/Off 제어 알고리즘을 이용할 경우 on이나 off상태 보다도 진동전달성이 작은 특징을 보이고 있다. 이러한 진동전달성을 구할 때 제어기의 출력은 그림 13과 같다. 그림 13은 진동 주파수 5Hz에 대해서 MR 댐퍼에 가해지는 On/Off 제어기의 출력을 나타낸 것이다.

그림 14는 시간 지연을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 On/Off 제어 알고리즘을 사용한 결과를 비교한 것이다. 시간지연이 고려되지 않을 경우 on/off의 타이밍을 정확히 맞추지 못해 최악의 경우 댐핑계수가 on이여야 하는 시점에 off가 되거나 그 반대의 상황이 발생하여 시스템의 성능이 저하된다. 고주파 진동일수록 댐퍼의 시간지연이 지배적이기 때문에 3.5Hz부터 차이가 커지며 따라서 제어기 설계시 MR 댐퍼의 응답속도를 고려해야 한다.

그림 15는 MR 댐퍼에 3, 4, 5Hz로 진동을 가하여 응답시간을 나타낸 것이다. On/Off 제어 알고리즘이 외란의 정보를 반주기만에 찾아 주어 시간지연을 고려한 on/off함으로써 일정량 반복되어 진동되는 임의의 주파수 입력에 대해 진동이 감소된다.

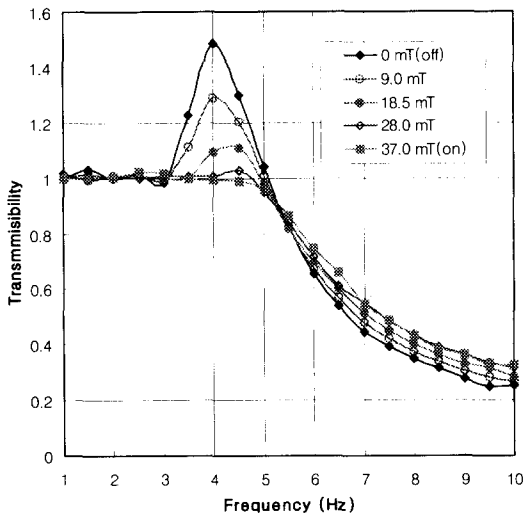


그림 11. 주파수 영역에서의 진동전달성.
Fig. 11. The vibration transmissibility in the frequency domain.

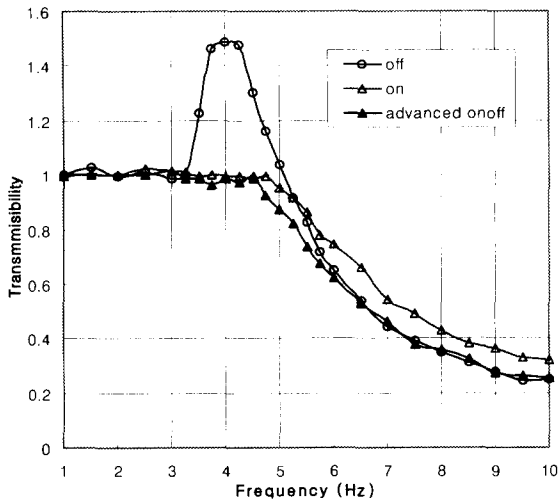


그림 12. 시간지연을 고려한 On/Off 제어 알고리즘의 진동전달성.
Fig. 12. The vibration transmissibility of the advanced On/Off control algorithm.

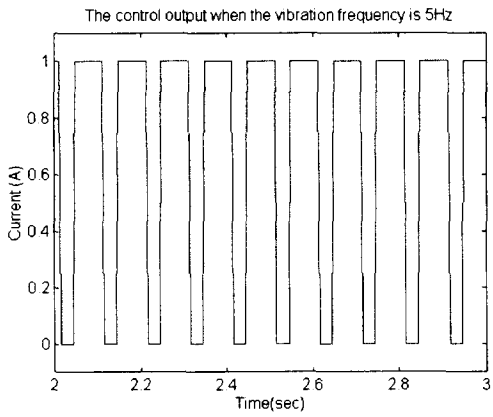


그림 13. 진동 주파수가 5Hz일 때의 제어기 출력값.
Fig. 13. The control output when the vibration frequency is 5Hz.

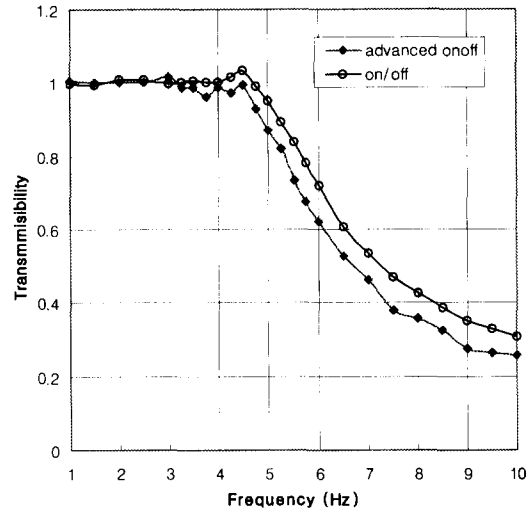


그림 14. 시간지연을 고려한 On/Off와 기존의 On/Off 제어 알고리즘의 비교.
Fig. 14. Comparison of the On/Off and advanced On/Off control algorithm.

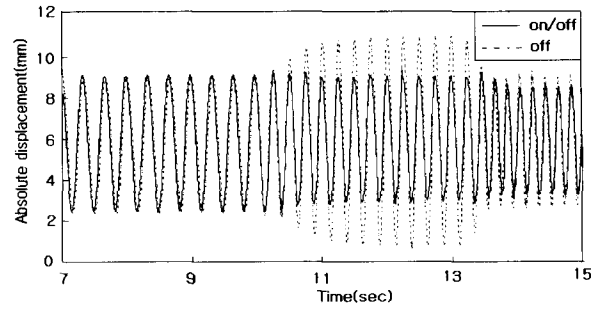


그림 15. 시간영역에서 3, 4, 5Hz 성분의 진동 주파수에 대한 질량 M의 응답양상 (off와 On/Off 제어 알고리즘의 시간응답 비교).
Fig. 15. The time response of the mass M (Comparison of the off and the advanced On/Off control algorithm in time domain).

V. 결론

설계 및 제작된 MR 댐퍼를 이용하여 반능동식 진동 제어 알고리즘에 의해 10Hz까지의 주파수영역에서 진동을 억제하는 실험을 행하였는데 이에 대한 결과를 관찰할 수 있다.

1. MR 댐퍼의 응답속도를 측정하기 위한 실험 장치를 제안하고 이를 통해서 댐퍼의 시간지연 값을 측정하였다. 댐퍼의 시간지연은 기계적 설계에 따라 달라지며 실제 MR 유체의 응답속도보다도 매우 크다.

2. 제어기를 설계하는데 있어서 댐퍼의 시간지연은 고려되어야 한다. MR 댐퍼에 반능동식 진동 제어 알고리즘을 적용하였기 때문에 시간지연은 상대적으로 고주파영역에서 중요하며 실험적 결과는 시간지연을 고려한 On/Off 제어기가 댐퍼의 시간지연을 포함하지 않은 기존의 On/Off 제어기보다 우수한 성능을 가짐을 보여준다.

참고문헌

[1] J. D. Carlson, D. M. Catanzarite and K. A. St. Clair, "Commercial magnetorheolo-gical fluid devices," *5th Int. Conf. on ER, MR Suspensions and Associated*

Technology, 1995.

[2] H. F. Chen and D. A. Guenther, "Self-tuning optimal control of an active suspension," *SAE Technical paper series*, 892485.

[3] Y. Guy, M. W. Kerastas and R. E. Bruckman, "A solenoid-actuated pilot valve in a semi-active damping system," *SAE Technical paper series*, 881139.

[4] A. Hac, "Repetitive control of bilinear systems with application to semi-active isolation of vibration," *Int. J. Control*, vol. 61, no. 6, pp. 1265-1296, 1995.

[5] M. R. Jolly and L. R. Miller, "The control of semi-active dampers using relative feedback signals," *SAE Technical paper series*, 892483.

[6] D. Martinus, B. Soenarko and Y. Y. Nazaruddin, "Optimal control design with preview for semi-active suspension on a half-vehicle model," *IEEE Proc. of the 35th Conf. on Decision and Control*, pp. 2798-2803, 1996.

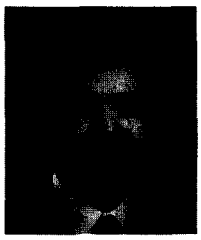
[7] L. R. Miller and C. M. Nobles, "The design and development of a semiactive suspension for a military tank," *SAE technical paper series*, 881133.

[8] S. Morishita and J. Mitsui, "An electronically controlled engine mount using electrorheological fluid," *SAE Technical paper series*, 922290, 1992.

[9] Y. Okada and H. Harada, "Regenerative control of active vibration damper and suspension systems," *Proc. of the 35th Conf. on Decision and Control*, pp. 4715-4720, 1996.

[10] A. Pinkos, E. Shtarkman and T. Fitzgerald, "Actively damped passenger car suspension system with low voltage electrorheological magnetic fluid," *Transportion System ASME*, DSC-vol. 54/DE-vol. 76, pp. 1-12, 1994.

[11] X. M. Wu, J. Y. Wong, M. Sturk and D. L. Russell, "Simulation and experimental study of a semi-active suspension with an electrorheological damper," *Proc. of 4th Int. Conf. on ER fluids*, pp. 568-586, 1993.

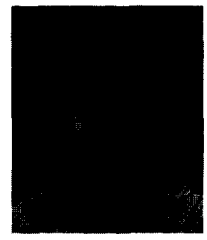


전 도 영

1984년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1986년 Univ. of California, Berkeley 기계공학과(공학석사). 1991년 Univ. of California, Berkeley 기계공학과(공학박사). 1991년~1992년 Univ. of California, Berkeley 연구원. 1992년~1994년 Univ. of Miami 조교수. 1994년~현재 서강대학교 기계공학과 부교수. 주관심분야는 CNC공작기계 및 기계시스템의 서어보제어, 로봇제어 및 응용, 지능형유체 응용 및 진동제어.

유 정 열

1969년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1977년 Univ. of Minnesota 기계공학과(공학박사). 1978년~현재 서울대학교 기계공학과 교수. 주관심분야는 유체공학, CFD, 비뉴톤유체 해석, 가스터빈 유동 해석.



박 찬 호

1997년 서강대학교 기계공학과(공학사). 1997년~현재 서강대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 지능형유체 응용 및 진동제어.