

# 자기유변유체를 이용한 마이크로 가변형 댐퍼

김기덕\*, 심원철\*, 전도영\*\*, 최범규\*\*

## A Controllable Micro Damper Using Magneto-Rheological Fluids

Kiduck Kim\*, Wonchul Sim\*, Doyoung Jeon\*\* and Bumkyoo Choi\*\*

### ABSTRACT

This paper provides a new concept of the controllable micro damper using MR(Magneto Rheological) fluids. The damper is composed of four layers which are fabricated by wet etching. The process of the fabrication is explained and the change of damping property is experimentally shown. Since the damping force is controllable by the applied magnetic field, the vibration can be effectively absorbed.

**Key Words** : controllable micro damper (마이크로 가변형 댐퍼), MR(Magneto-Rheological) Fluids (자기유변유체), damping constant (댐핑 상수)

### 기호설명

- $\tau$  : Shear stress
- H : Magnetic field intensity
- $\mu$  : Viscosity of fluids
- $\dot{\gamma}$  : Shear strain rate

### 1. 서론

최근 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 가공 공정을 이용한 마이크로 장치들이 많이 개발되고 있으며 그 실용성도 부각되고 있다. 이러한 장치들은 대부분 액추에이터와 센서로서 마이크로 터빈, 모터, 펌프, 가속도 센서, 압력 센서 그리고 밸브 등이 주종을 이루고 있다. 마이크로 구조물과

정밀 기기에서도 충격 흡수와 진동의 정밀제어를 위해서 댐퍼가 필요한데 현존하는 댐퍼는 이와 같은 미세 진동이나 충격을 효과적으로 흡수하거나 감소시킬 수 없는 실정이다. 지금까지는 단지 마이크로 구조물에서 스퀴즈 필름의 영향을 받는 점성 댐핑에 대한 모델과 점성에 의한 에너지 손실에 대한 연구만이 수행되고 있을 뿐이다<sup>[1]</sup>. 이에 본 연구에서는 미세 진동을 흡수할 수 있는 마이크로 가변형 댐퍼를 개발하였다.

일반적으로 댐퍼는 수동형, 능동형과 반능동형으로 구분되는데 수동형 댐퍼는 고정된 댐핑 상수를 갖으며 외부 힘의 특성에 따라 이상적인 성능을 가질 수 없다. 즉 시스템의 진동을 효과적으로 흡수하기 위해서는 외부 힘의 주파수 특성에 따라 댐핑계수를 변화시키는 것이 필요하나 수동형 댐퍼의 경우는 불가능하다. 능동형 댐퍼는 시스템과 진동원 사이에 유압이나 공압과 같은 작동기를 장착하

\* 서강대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 서강대학교 기계공학과

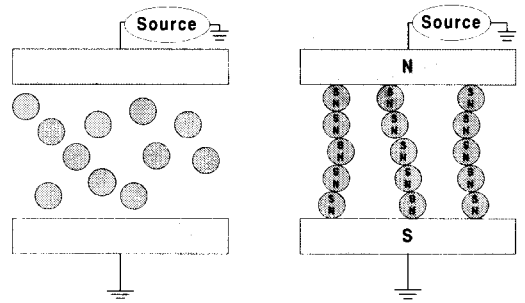
여 혁신적으로 진동을 감소시킬 수 있으나 외부로부터 에너지 공급이 있어야 하므로 구동기를 필요로 하는 단점이 있다. 반응동형 댐퍼는 전기 모터나 전자 제어 밸브를 이용하여 수십 단계의 댐퍼 상태를 갖는 다단 댐퍼나 연속 가변 댐퍼를 뜻하며 외부로부터 에너지 공급 없이 능동형 댐퍼와 유사한 성능을 보일 수 있다.

1990년대 들어 지능형 물질이라고 불리는 전기유변 및 자기유변유체를 이용한 전자 제어 방식의 연속 가변 댐퍼에 대한 연구가 진행 중에 있다. 전기유변 및 자기유변유체는 각각 전기장과 자기장의 변화에 의해서 유체의 항복 전단 응력이 바뀌는 특성을 가지고 있어서 이를 이용하면 외부의 진동에 따라 댐핑상수가 바뀌어 시스템 진동을 효율적으로 억제할 수 있다. 마이크로에서도 개발 가능한 댐퍼는 고성능과 안정성을 가지는 반응동형 댐퍼가 있는데 전기 모터나 다단 밸브를 이용한 댐퍼는 마이크로에서 제작이 어려우므로 최근 연구가 진행되고 있는 자기유변유체를 사용한 댐퍼를 제작하도록 한다.

따라서 본 연구는 자기장에 따라 점도가 변하는 자기유변유체를 사용한 마이크로 가변형 댐퍼를 설계, 제작하고 그 특성을 살펴봄으로써 마이크로 구조물에서의 진동제어 가능성에 대하여 제시하고자 한다

## 2. 자기유변유체의 특성

자기유변유체는 실리콘 오일 내에 자성을 가진 1 ~ 50 $\mu$ m의 탄소강 미립자로 구성되어 있다. Fig.1 과 같이 분산된 미립자에 자기장을 인가하면 입자들이 N극과 S극의 극성을 가지게 되어 사슬구조를 형성하게 된다. 이 사슬구조가 유체의 흐름을 방해하게 되어 점성이 증가하고 유체의 전단 항복응력이 증가한다. 자기장이 작용하지 않는 경우에는 유체입자가 자유롭게 운동하는 뉴토니안 유체의 특성을 갖으며 자기장이 작용하면 유체 중에 분산되어 있던 입자가 N극과 S극으로 사슬구조를 형성하여 유체의 항복응력이 자기장의 세기에 따라 바뀌는 빙햄 유체 특성을 갖게 된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다<sup>[4]</sup>.



With no magnetic fields      With magnetic fields  
Fig. 1 The behavior of MR fluids

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

이러한 빙햄 유체의 특성을 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같다. 기울기는 점성  $\mu$ 가 되고 자기장의 세기 H가 증가함에 따라 유체의 전단 응력이 증가하게 된다<sup>[2]</sup>.

자기유변유체는 작용하는 자기장에 대한 반응속도가 빠른 특징이 있는데 대략적으로 자기장 변화에 대한 응답시간이 수 msec로 알려져 있다. 그러므로 실시간 제어가 가능하며 기계 시스템과 전자 제어 상호간의 융합이 용이하다. 또한 생산 및 장치의 동작 시에 첨가될 수 있는 불순물의 영향이 적고 독성이 없어 어느 환경에서나 안전하다. 본 연구에서 사용한 자기유변유체의 특성은 Table.1과 같다<sup>[3]</sup>.

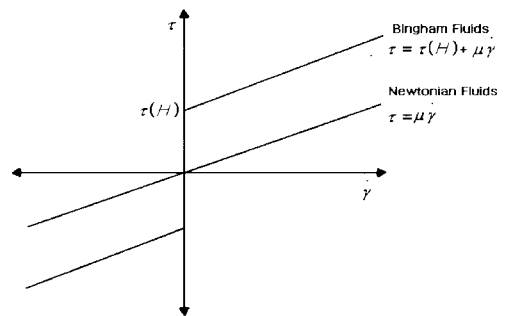


Fig. 2 The property of Bingham fluid

Table 1 The properties of MR fluids

Operating Temperature	-40°C to 150°C
Density	3.04 g/cm <sup>3</sup>
Color	Gray/Black
Coefficient of Thermal Expansion	Units
0 to 50°C	0.551 × 10 <sup>-3</sup>
50 to 100°C	0.599 × 10 <sup>-3</sup>
100 to 150°C	0.665 × 10 <sup>-3</sup>
Specific Heat 25°C	0.5-0.7 J/g°C
Thermal Conductivity 25°C	0.25 ~ 1.05w/m°C
Flash Point	> 150°C
Viscosity in Pa. sec	
10 s <sup>-1</sup>	1.1
80 s <sup>-1</sup>	0.4

### 3. 마이크로 자기유변댐퍼

#### 3.1 마이크로 자기유변댐퍼의 구조

자기유변댐퍼의 구조는 Fig. 3과 같이 2개의 멤브레인, 오리피스와 어큐플레이터의 네 개 구조물로 구성되어 있다. 제작된 댐퍼의 체적은 7.2mm × 4mm × 2.1mm이고 박막의 면적은 1mm × 1mm로서 댐퍼의 역할을 하는 중심 부분과 양쪽에 자기장을 주기 위한 솔레노이드를 가지고 있다. 마이크로 자기유변댐퍼에서 멤브레인 ①은 스프링 역할을 하며 내부에 채워진 자기유변유체가 댐퍼의 역할을 한다. 댐핑 효과는 오리피스 ②의 형상에 의해 극대화된다. 멤브레인 ①의 움직임에 의해서 댐퍼 내부에 부피 변화가 일어나게 되는데 이러한 부피변화에 의한 압력 손실을 줄이기 위하여 가스로 채워진 어큐플레이터 ④가 있다. 자기유변유체를 댐퍼 안에 주입하기 위해서 오리피스에 마이크로 채널을 만들

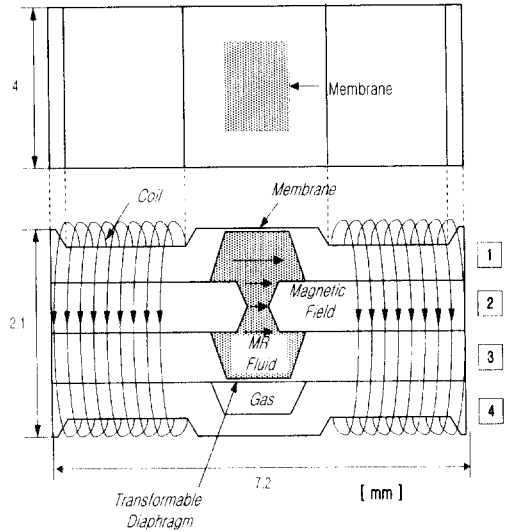


Fig. 3 The structure of MR damper

고 자기장을 인가하기 위해 코일을 감을 문턱을 멤브레인 ①과 어큐플레이터 ④의 양쪽에 제작하였다. 코일에 전류를 가하여 자기장을 형성하면 자기유변유체 입자들이 자기장 방향으로 쇠사슬 형태로 결합하여 유체의 전단 응력을 바꾼다. 따라서 외부에서 충격이나 진동이 가해지면 멤브레인 ①에 의해 그 힘이 댐퍼 내부로 전달되고 솔레노이드에서 인가된 자기장이 자기유변유체 입자들을 자기장의 방향으로 나열하여 전달된 힘을 상쇄시킨다. 또한 자기장의 세기를 변화시킴으로써 댐퍼의 댐핑력을 조절할 수 있는 가변형 댐퍼의 역할이 가능하다.

#### 3.2 마이크로 자기유변댐퍼의 제작 과정

마이크로 자기유변댐퍼의 제작 공정은 크게 부피 미소 가공 공정과 집합 공정으로 나눌 수 있다. 제작에 사용된 웨이퍼는 4in (100) p-type 두께 525 μm 이다. 부피가공 공정은 습식 식각을 통해 이루어지는데(100) 웨이퍼의 경우 결정 방향으로의 식각비 때문에 54.74° 방향으로 식각 된다.

Fig. 4는 마이크로 자기유변댐퍼를 만들기 위한 부피 미소 가공 공정을 나타낸 그림이다. (a), (b), (c)는 멤브레인 ①을 만들기 위한 공정으로서 먼저 1100°C에서 100분 동안 5000Å의 습식 산화막을 성장시킨 후, 감광제를 입히고 열라이너를 이용하여 마스크의 패턴대로 UV 노광한다. 버퍼드불산(BHF)으로 문턱을 만들 부분의 산화막을 제거하고

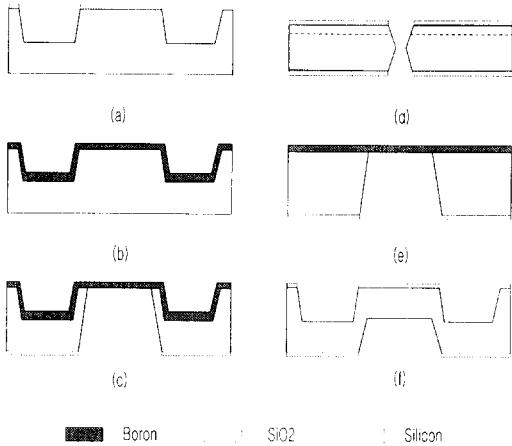


Fig. 4 The fabrication process of the micro MR damper (processes (a)-(c) are for membrane 1, (d) for orifice 2, (e) for membrane 3, and (f) for accumulator 4.)

EDP(Ethylene Diamine Pyrocatechol)용액으로 200 $\mu\text{m}$  식각한다(a). 이 위에 확산 깊이 3 $\mu\text{m}$ , 농도  $6 - 7 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 로  $p^+$ 도핑을 한다(b). 그런 후 반대쪽에서 EDP 식각하면  $p^+$ 막에 의해 자동 식각 정지되어 멤브레인 1을 형성한다(c). (d)는 오리피스 2를 만들기 위한 공정으로 (a)와 같은 방법으로 웨이퍼 양면에 산화막을 성장시키고 262.5 $\mu\text{m}$  EDP 식각한다. 이 때 자기유변유체를 주입하기 위한 미세 유로(Fig.4 (d)의 점선)를 만들기 위해 웨이퍼 판의 중앙에 폭 200 $\mu\text{m}$ , 깊이150 $\mu\text{m}$ 로 식각한다. (e)는 멤브레인 3의 공정을 나타낸 것으로 멤브레인 1의 공정 중 둔덕 식각을 제외하고는 동일한 방법으로 제작한다. 어큐뮬레이터 4를 제작하기 위해서는 웨이퍼 양면에 산화막을 성장시키고 양면 식각한다. (f)에서 위쪽의 둔덕은 코일을 감기 위한 것이고 아래쪽의 둔덕은 가스가 채워질 다이아프램이다. 이렇게 만든 4개의 구조물을 Fig. 3과 같은 순서로 에폭시로 접합한 후 주사기를 사용하여 유로에 자기유변유체를 주입시킨 후 봉합한다. 또한 멤브레인의 재질로서  $p^+$  막과 함께 실리콘 러버막을 코팅하여 보다 유연한 멤브레인을 가진 댐퍼를 제작하였다. Fig. 5는 실제 제작된 마이크로 가변형 자기유변댐퍼를 성냥개비와 비교한 사진이다.

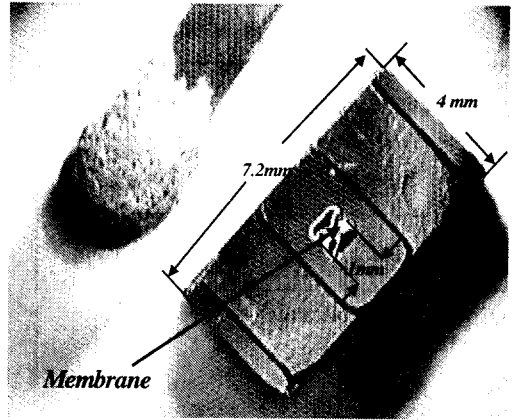


Fig. 5 The picture of micro MR damper

#### 4. 실험 장치 및 실험 결과

Fig. 6은 제작된 마이크로 자기유변댐퍼의 가진 실험을 위해 구성된 실험 장치의 개략도이다. 함수발생기로 만든 사인 형태의 가진 입력을 증폭기에 연결하여 가진기를 5Hz에서 40Hz 까지 가진시킨다. 마이크로 자기유변댐퍼를 가진기에 부착시키고 댐퍼의 멤브레인 변위를 레이저 센서로 측정하여 컴퓨터로 읽는다. 이 신호를 시간에 대한 변화와 주파수에 대한 응답으로 연산하여 결과를 비교하고 분석한다. 레이저 센서의 신호는 변위에 대한 전압

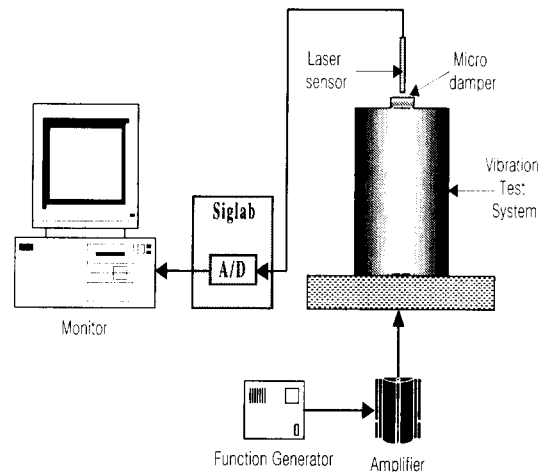


Fig. 6 The experimental setup

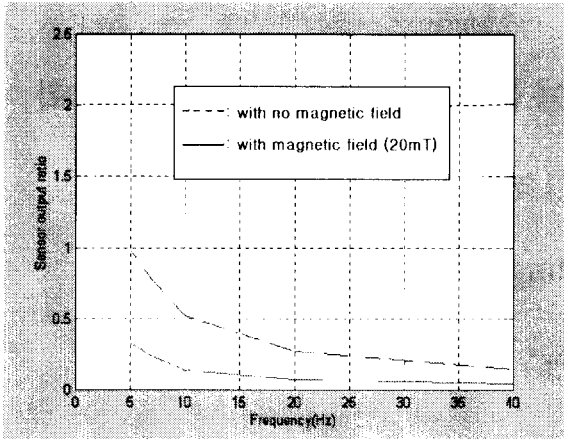


Fig. 7 The vibration response of the damper with MR fluid

비로 나타낸다. 즉 모든 주파수에서 레이저 센서의 출력 전압을 함수발생기의 입력값으로 나누어 그래프로 나타내었다.

Fig. 7은 마이크로 가변형 댐퍼의 진동 특성을 나타낸 그래프인데 저주파에서 큰 값을 갖는 것은 가진기의 특성에 의한 것이다. 그래프에서 보는 바와 같이 자기장이 작용하는 경우와 자기장이 작용하지 않는 경우는 진동 특성이 주파수 영역에서 변화되는 것을 알 수 있다. 제작된 댐퍼에는 질량을 따로 부착하지 못하였고 공진 주파수가 고주파에 있기에 그림에서는 단지 자기장이 가해짐에 따라 댐퍼 가장 위층 멤브레인의 진동이 줄어들음을 보여 주고 있다.

### 5. 결론

본 연구는 자기장의 세기에 따라 점성이 변화하는 자기유변유체(MRF)를 이용하여 미세 충격 흡수 및 진동제어를 목적으로 마이크로 가변형 자기유변 댐퍼를 설계 및 제작하고 그 특성을 파악하여 마이크로 구조물에서의 진동제어 가능성을 최초로 제시하였다. 위 결과를 토대로 하여 자기장에 의해 마이크로 구조물의 진동을 감소시킬 수 있을 것이며 또한 마이크로 가변형 자기유변댐퍼에 적합한 제어 알고리즘이 개발된다면 마이크로 구조물에서의 충격 및 진동 제어가 가능할 것이라 기대된다.

### 후기

본 연구는 한국학술진흥재단 97 대학부설연구소 과제연구비에 의하여 연구되었으며, 제작을 위해 아주대학교 실리콘 반도체 실험 장비를 사용하게 해주심에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Young-Ho Cho, Albert P.Pisano, and Roger T.Howe, "Viscous Damping Model for Laterally Oscillation Microstructures," Journal of Micro-electromechanical System, Vol. 3, pp. 81-87, 1994.
2. Cl.Kormann, H.M.Laun, H.J.Richer "MR Fluids with nano-magnetic particles," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, pp. 3167-3172, 1996.
3. Keith D.Weiss, Theodore G.Duclos, J.David Carlson, Michael J.Chrzan, and Anthony J.Margida, "High Strength Magneto-and Electro-rheological Fluids," SAE Technical paper series, 932451
4. Lord사 인터넷, www.rheonetic.com