

자성유체를 이용한 반능동식 댐퍼에 관한 실험적 연구

황승식*

An Experiment Study of Semi-Active Damper Using Magnetic fluid

Seungsik Hwang*

Key Words: Magnetic Fluid (자성유체), Magnetism (자화), Damping ratio (감쇠비), Spring-Mass System (스프링 질량 계)

ABSTRACT

The aim of this study is to provide fundamental information for the development of Semi-Active Damper Using Magnetic fluid. To achieve the aim, the damping effect of magnetic fluid is investigated by experiments that the diameter of inner circular bar and the input amplitude were varied in the magnetic field generated by the permanent magnet and the electromagnet coil. From the study, the following conclusive remarks can be made. As the diameter of inner circular bar and input amplitude increase, the damping effect is improved. This is explained by the fact that as the contact area between inner circular bar and magnetic fluid increases, the increase of friction lowers kinematic energy. If the magnetic field is generated, the damping effect is improved. This is explained the assumption that as the intensity of magnetic fluid particle increases, there is virtual mass phenomenon.

1. 서론

제진장치로서 가장 일반적으로 사용하는 것이 댐퍼이다. 댐퍼는 사용목적에 따라 수동형과 능동형으로 구분되는데, 수동형은 가변적인 외란에 능동적으로 대처하지 못하여 성능이 저하된다는 단점이 있다. 능동형은 수동형의 이런 단점을 극복하기 위해 유공압 및 전기적 힘 등으로 기계 메카니즘을 작동시켜 가변적인 외란 대처에 적합하다. 그러나 장치를 구동시키기 위해 에너지를 직접 공급해야 하기 때문에 장치가 복잡하며 고가가 된다. 따라서 기존의 수동형 장치와 같이 단순한 형식을 가지고 순간적인 운동 상태에 대해서 댐퍼관을 조절하여 감

쇠력을 변화시킴으로써 제어력을 발생시키는 반능동식 장치가 제안되었다.

전기유동유체를 이용한 반능동식 댐퍼는 소비전력이 낮으며 전기장의 변화만으로 시스템의 댐핑을 변화시킬 수 있으며, 반응속도도 빨라 실시간 연속제어가 가능하다. 그러나 전기유동유체는 최대항복응력이 3 kPa 정도로 낮고 온도 변화에 대해 불안정하여 작동시 유입되는 불순물에 의해 성능이 저하되기 쉬워 높은 점성과 안정성을 요구하는 댐퍼의 작동유체로는 부적절하다⁽¹⁾.

이러한 문제점을 해결하기 위해 반능동식 댐퍼에 자성유체를 사용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 먼저 자성유체에 대하여 살펴보면, 자성유체는 고체와 액체의 혼합액으로 크기가 150 Å 정도인 강자성 미립자, 용매 및 계면활성제로 구성되어 있다⁽²⁾. 자성유체 중에서 미

* 국민대학교 기계, 자동차공학부
책임저자 E-mail : hwangss@dreamwiz.com

립자들 사이의 자력에 의한 입자들의 응집을 피하기 위하여 계면활성제가 부착되어 계면활성제의 탄성 반발력에 의해 응집이 방지된다⁽³⁾. 그리고 중력장과 자장의 구배에 의해 일어나는 미립자의 침전은 미립자의 브라운 운동에 의해 방지된다. 이로 인해 자성유체 속의 미립자는 응집이나 침전하지 않고 안정하게 분산할 수 있다⁽⁴⁾.

자성유체의 가장 두드러진 특징은 외부에서 가하는 자장에 반응하여 비중이 증가하며 자기압력을 발생시키는 것이다. 그러므로 자장만으로도 제어가 가능하고 반응속도도 빠르며 최대항복응력도 10~100 kPa까지 유지할 뿐만 아니라 온도 변화에 대해서 안정성을 갖추고 있으므로 자성유체를 댐퍼에 적용시키는 것이 가능하다⁽¹⁾.

자성유체를 댐퍼에 이용하고자 할 때 자장의 영향은 입자의 응집과 함께 복잡한 양상을 나타낼 것이 예상된다. 그러나 댐퍼의 진동 특성에 대하여 자장의 변화를 통해 제어 가능할 것으로 기대되므로 본 연구에서는 자성유체를 이용하여 점성댐퍼를 개발하고자 할 때, 기초적 자료를 영구 자석과 전자석을 사용하여 자장의 작용이 반능동식 댐퍼의 진동특성에 미치는 영향을 실험적으로 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

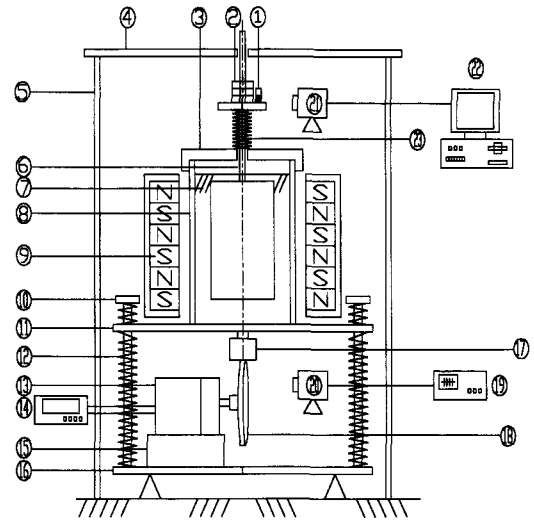
실험장치는 크게 스프링-질량 시스템과 자장발생부, 출력진폭을 측정하는 계측부, 입력진폭을 가하는 진동여자장치로 나뉘어 진다.

스프링-질량 시스템은 외부실린더, 내부환봉 및 스프링으로 구성되어 있으며, 스프링-질량 시스템의 진동특성을 스프링에 의한 스프링의 진동과 외부실린더 및 내부환봉 사이의 작동유체의 점성에 의해 스프링의 진동을 감소시키도록 설계하였다.

자장 발생부는 영구자석과 전자석으로 나뉜다. 영구자석은 8개를 겹쳐서 외부 실린더 주위에 2 mm의 간격으로 설치하였다. 전자석은 함수 발생기에서 발생시킨 직류전압을 사용하였다.

계측부는 가우스 미터, 카메라, 비전보드 그리고 측정판으로 구성되며 측정된 출력진폭을 모니터에 표시될 수 있도록 하였다.

진동여자장치는 기반 진동을 주기 위한 DC모터와 DC



- | | |
|--------------------------------------|------------------------|
| ① Output amplitude measurement board | ⑫ Lower support spring |
| ② Mass | ⑬ DC motor |
| ③ Spring guide | ⑭ DC power supply |
| ④ Upper board | ⑮ DC motor board |
| ⑤ Upper board support stand | ⑯ Lower support board |
| ⑥ Inner cylinder | ⑰ Rotator |
| ⑦ Working fluid | ⑱ Cam |
| ⑧ Outer cylinder | ⑲ Tachometer displayer |
| ⑨ Permanent magnet | ⑳ Tachometer |
| ⑩ Spring support board | ㉑ Camera |
| ⑪ Outer cylinder support board | ㉒ Vision system |
| | ㉓ Working spring |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

전원공급기, 캠, Tachometer 디스플레이, 진동수를 측정하기 위한 Tachometer 센서로 구성되어 있으며, 입력진폭을 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 mm까지 조절하도록 캠이 4종류로 설계되었다.

2.2 실험방법

본 실험은 자장 인가 유무로 나누어 실험을 하였는데 본 실험에서 사용된 자성유체는 물이 용매인 자성유체보다 대체로 안정된 자화의 특성을 갖는 등유가 용매인 HC-50을 사용하였다.

Table 1은 HC-50의 물성치를 나타낸 것이다.

스프링-질량 시스템에서 자성유체의 진동감쇠정도를 파악하기 위해 영구자석을 이용하였으며 자속밀도의 최대값은 영구자석의 중심점에서 4200 Gauss이고 자속밀도의 분포를 측정하여 Fig. 2에 나타내었으며 실험 방법은 다음과 같다.

Table 1 Physical properties of magnetic fluid

Physical	Spec.
Color	black brown
Solvent	kerosene
Working temperature range(°C)	-20~120
Specific gravity	1.39±0.02
Density at 25 °C(kg/m ³)	1390
Surface tension at 25 °C(dyne/cm)	26±2
Saturation magnetization(Gauss)	4750±300

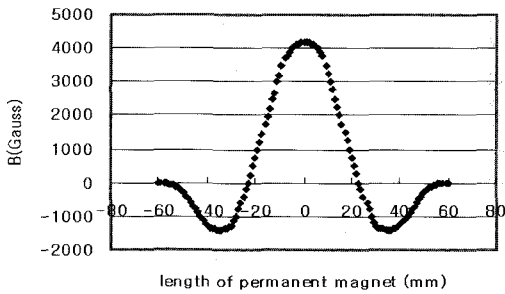


Fig. 2 Distribution of magnetic flux density in permanent magnet

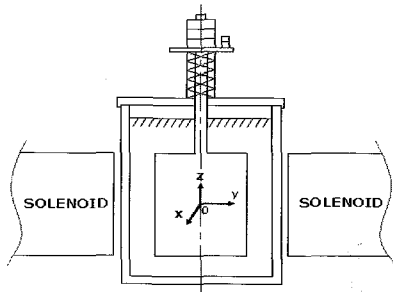


Fig. 3 Schematic diagram of spring-mass system with electromagnet

먼저 스프링-질량 시스템이 가지는 공진점을 측정하기 위해 자성유체를 사용하지 않은 상태에서 입력진동수에 따른 진폭비를 측정하였다.

자성유체 자체의 진동감쇠 효과와 자장의 발생에 의한 감쇠 효과를 비교하기 위하여 각각의 주요 변수에 대해서 자장 인가 유무에 따라 실험하였다. 즉, 자성유체 자체의 경우와 자장을 가한 경우의 진동감쇠 효과를 측정하기 위해 스프링-질량 시스템의 내부환봉직경을 10, 14, 18 및 22 mm 각각에 대해 입력진폭을 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 mm로 변화시켜 동일한 실험을 수행하였으며, 입력진동수는 20.94 rad/s ~ 41.89 rad/s 까지 2.1 rad/s 씩 변화를 주었다. 실험결과를 이용하여 자장을 가했을 경우의 각

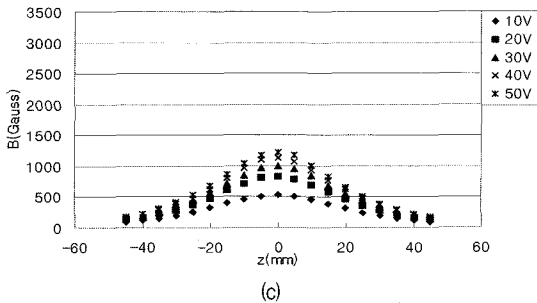
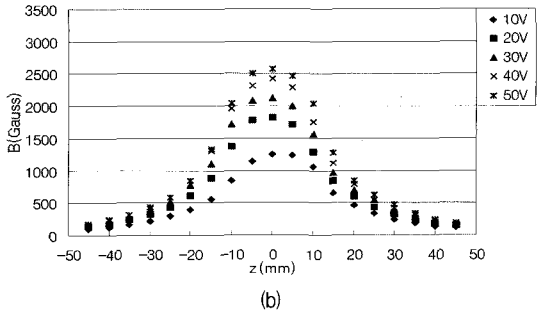
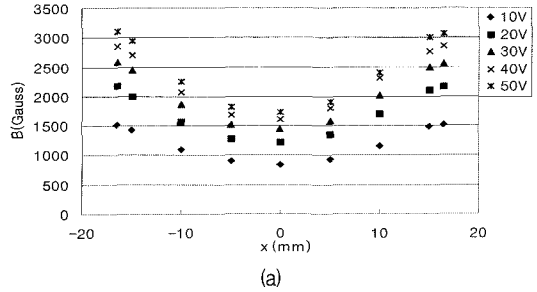


Fig. 4 Distribution of magnetic flux density in electromagnet at (a) $y=0$ mm, $z=0$ mm, x -direction, (b) $x=10$ mm, $y=0$ mm, z -direction and (c) $x=0$ mm, $y=10$ mm, z -direction

각의 실험변수에 따른 감쇠비 변화를 구하였다. 또한 점성댐퍼의 작동유체로 자성유체의 적용가능성을 파악하기 위하여 전자석에 함수발생기를 이용하여 자장을 인가하였다.

전자석의 경우 자장실험에서 감쇠비가 가장 큰 내부환봉직경 18 mm, 입력진폭 2.5 mm로 입력진동수를 8.4 rad/s ~ 41.9 rad/s 까지 2.1 rad/s 씩 변화시키면서 모든 실험을 하였다.

함수발생기의 입력전압을 10~50 V까지 10 V씩 증가시키면서 입력진동수에 대한 진폭을 측정하였다. Fig. 3는 좌표를 나타내며 Fig. 4 (a), (b) 및 (c)는 전자석의 입력전압에 따른 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 캠에 의해 가해진 입력 진폭에 따라 자장이 없는 자성유체, 자장을 가한 자성유체로 나누어 스프링-질량 시스템의 응답특성을 알아보았다.

3.1 고유 진동수의 측정

시스템의 고유진동수 ω_n 에 대한 입력진동수 ω 의 비를 기준으로 실험결과를 나타내기 위하여 시스템의 고유

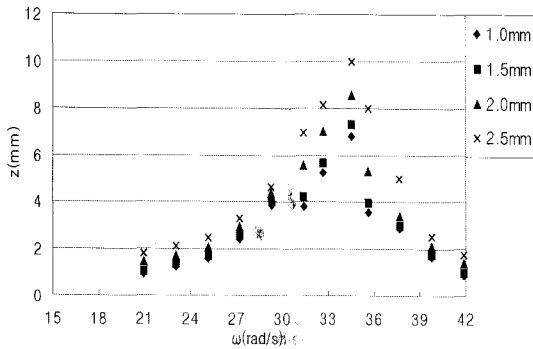


Fig. 5 Output amplitude variations to the input without fluid

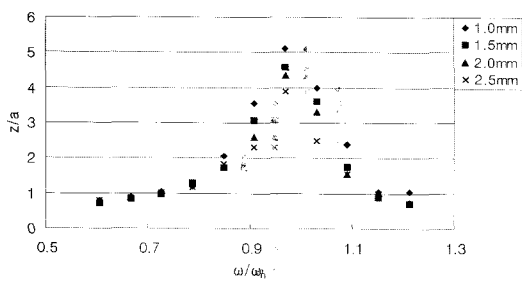
진동수를 측정하였다. 입력진동수 ω 는 20.9 rad/s ~ 41.9 rad/s 의 범위에서 2.1 rad/s 씩 증가시켰고 공진이 예상되는 범위인 31.4 rad/s ~ 35.6 rad/s 의 범위에서 1.05 rad/s 씩 증가시켰다. Fig. 5는 입력진동수를 위와 같이 변화시키고 질량이 62.2 g인 시스템에 입력진폭 a 을 1~2.5 mm의 범위에서 0.5 mm씩 증가시켜 주었을 때의 출력진폭 z 를 나타낸다. 출력진폭이 가장 큰 공진점에서의 진동수인 시스템의 고유진동수는 입력진폭에 상관없이 34.54 rad/s 로 나타났다.

3.2 무자장하에서 자성유체의 감쇠 효과

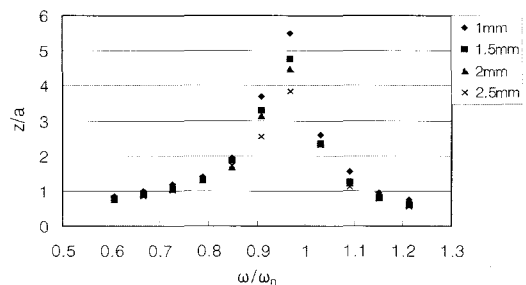
3.2.1 내부 환봉의 직경 변화에 따른 감쇠 효과

Figure 6 (a), (b), (c) 및 (d)는 내부 환봉 직경이 각각 10, 14, 18 및 22 mm인 경우를 나타낸 것이다.

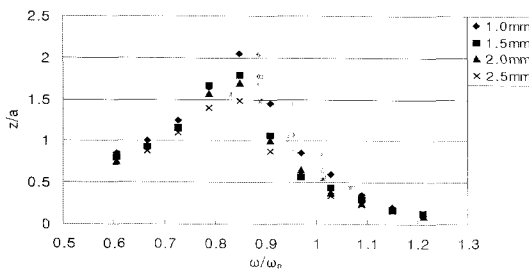
자성유체를 외부 실린더에 채운 상태에서 내부 환봉의 직경을 10, 14, 18 및 22 mm로 고정하고 입력 진폭 a 를 1.0~2.5 mm의 범위에서 0.5 mm간격으로 변화시키며 실험하였다. 22 mm인 경우를 제외한 나머지의 경우에는 입력 진폭이 커짐에 따라 출력 진폭이 커지는 것을 알 수 있다. 공진점을 지난 후 출력진폭이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 내부 환봉의 직경이 커짐에 따라 자성유체가 접촉하는 면이 증가하면서 마찰력이 증가하



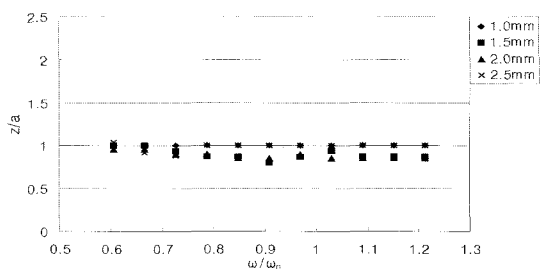
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.6 Magnetic fluid damping output amplitude and amplitude ratio without magnetic fluid for (a) $d=10$ mm, (b) $d=14$ mm, (c) $d=18$ mm; and (d) $d=22$ mm

여 점성 감쇠 효과가 커지는 것으로 생각된다. 이상의 결과를 비교하면 외부 실린더에 자성유체를 채우고 자장을 가하지 않은 상태에서 입력진폭을 1.0, 1.5, 2.0 mm 및 2.5 mm로 변화시키고 내부 환봉 직경이 10, 14 및 18 mm로 변화시켰을 때 ω/ω_n 은 0.97에서 0.85로 작아졌고 입력진폭이 커질수록 출력 진폭은 커지지만 내부 환봉 직경이 클수록 입력진폭에 대한 출력 진폭비는 감소하였다. 따라서 자장을 가하지 않은 경우 내부 실린더의 직경이 클수록 출력 진폭도 작아지고 출력진폭비도 감소하여 감쇠 효과가 향상됨을 알 수 있다. 내부 환봉 직경이 22 mm인 경우는 뚜렷한 감쇠 현상이 나타나지 않았는데 이는 내부 환봉의 표면과 외부 실린더 사이의 거리가 감쇠 현상을 일으키는데 필요한 임계거리 이하로 되어 잠김 현상이 발생했기 때문이라고 생각된다. 여기서 외부 실린더의 내경 (24 mm)에 대한 내부 환봉의 직경의 비가 0.75가 될 때까지는 자성유체에 의한 감쇠 효과가 증가함을 알 수 있다.

3.2.2 입력 진폭 변화에 따른 감쇠 효과

자성유체를 외부 실린더와 내부 실린더 사이에 채운 상태에서 입력진폭 a 를 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm 및 2.5 mm와 같이 고정하였다. 내부 환봉의 직경은 감쇠효과가 가장 좋은 18 mm로 설정하였으며 입력진폭에 대한 출력 진폭비 z/a 를 종축에 나타내고 횡축은 시스템의 고유진동수에 대한 입력진동수비 ω/ω_n 를 나타낸다. 입력진동수 ω 는 20.9 rad/s ~ 41.9 rad/s의 범위에서 2.1 rad/s씩 증가시켰다.

Figure 7로부터 자장을 가한 상태에서 입력 진폭의 변화에 따른 감쇠 효과를 살펴보면 공진점에서 입력 진폭이 클수록 입력 진폭에 대한 출력 진폭의 감쇠 정도가 커진다는 것을 알 수 있다.

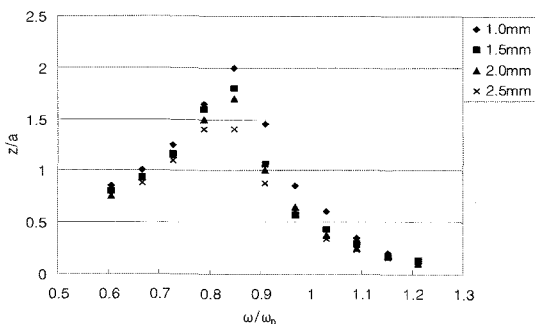
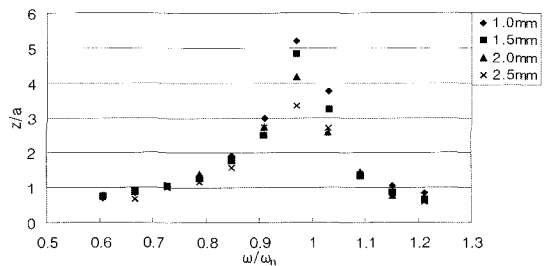


Fig. 7 Magnetic fluid damping amplitude ratio without magnetic field (d=18 mm)

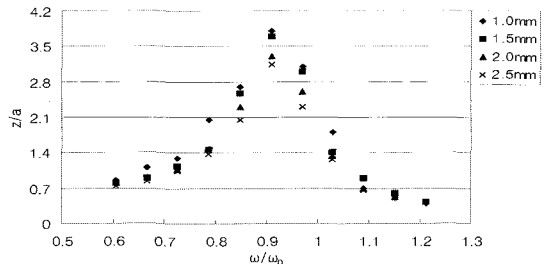
3.3 자장이 감쇠에 미치는 영향

3.3.1 내부 환봉의 직경 변화에 따른 감쇠 효과

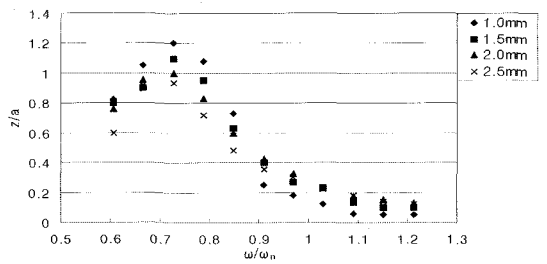
Figure 8 (a), (b) 그리고 (c)는 내부 환봉 직경이 각각 10, 14 그리고 18 mm인 경우를 나타낸 것이다. 여기서 22 mm는 외부 실린더의 내경에 대한 내부 환봉 직경의 비가 0.75 이상이 될 경우에 감쇠 효과가 떨어지므로 실험에서 제외하였다. 자성유체를 외부 실린더에 채우고 자장을 가한 상태에서 내부 환봉의 직경을 10, 14 및 18 mm와 같이 고정하고, 입력 진폭 a 를 1.0~2.5 mm의 범위에서 0.5 mm간격으로 변화시켰다. 공진점 ω/ω_n 은 0.97, 0.91 및 0.73으로 감소됨을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Magnetic fluid damping output amplitude and amplitude ratio with magnetic field using permanent magnet for (a)d=10mm, (b) d=14mm and (c) d=18mm

내부환봉의 직경이 10 mm인 경우는 자장을 가하지 않은 경우와 비슷한 경향을 나타냈지만 14 mm 및 18 mm인 경우는 자장을 가하지 않은 경우보다 출력 진폭이 감소함을 나타낸다. Fig. 8 (a)와 자장을 가하지 않은 같은 조건인 Fig. 6 (a)를 비교해보면 입력 진폭이 1.0mm와 1.5 mm인 경우는 비슷한 경향을 나타냈지만 진폭이 2.5 mm일 때는 14 % 감소하였고, Fig. 8 (b)에서 입력 진폭에 대해 출력 진폭의 감쇠 정도가 가장 좋은 입력 진폭이 2.5 mm일 때 공진점에서의 입력 진폭에 대한 출력 진폭비는 자장을 가한 내부 환봉 직경이 10 mm일 때와 비교하여 20 %가 감소하였으며, Fig. 8 (c)에서 입력 진폭이 2.5 mm일 때 자장을 가하지 않은 내부 환봉 직경 14 mm와 비교하면 65 %가 감소함을 알 수 있다. 이는 입력 진폭이 증가하면서 자성유체가 마찰을 일으키는 면적이 커지면서 점성 감쇠 효과가 커지는 동시에 자장이 가해지면서 자성유체의 입자가 응집하게 되고 질량이 부가되는 것 같은 현상이 나타나기 때문이라고 생각된다.

3.3.2 입력 진폭에 변화에 따른 감쇠 효과

자성유체를 외부 실린더에 채우고 자장을 가한 상태에서 입력진폭 a 를 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 mm와 같이 고정하고 내부 환봉의 직경은 감쇠효과가 가장 좋은 18 mm로 설정하였으며 입력진폭에 대한 출력 진폭비 z/a 를 종축에 나타내고 횡축은 시스템의 고유진동수에 대한 입력진동수비 ω/ω_n 를 나타낸다. 입력진동수 ω 는 $20.9 \text{ rad/s} \sim 41.9 \text{ rad/s}$ 의 범위에서 2.1 rad/s 씩 증가시켰다.

Figure 9는 자장을 가한 상태에서 입력 진폭의 변화에 따른 감쇠 효과를 나타낸 것이다. 각각의 공진점에서 입력 진폭에 대한 출력 진폭비는 자장을 가하지 않은 입력 진폭이 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 mm일 때와 비교하면 41, 49, 41 및 22 %가 감소함을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 입력 진폭이 클수록 입력 진폭에 대한 출력 진폭비가 감소함을 알 수 있다.

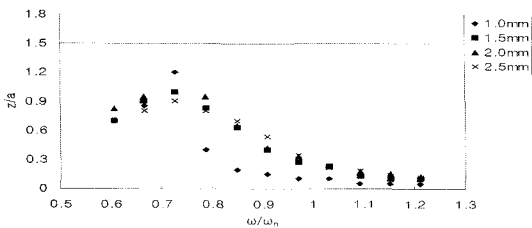


Fig. 9 Magnetic fluid damping amplitude ratio with magnetic field using permanent magnet

3.3.3 자성유체와 자장의 감쇠효과에 대한 비교

Figure 10의 (a)와 (b)는 내부 환봉 직경이 각각 14 mm, 18 mm이고 입력진폭이 2.5 mm일 때 자성유체와 자장이 입력 진폭에 대한 출력 진폭비 z/a 에 미치는 영향을 나타낸다. 유체가 없는 경우와 자장을 가하지 않은 자성유체의 경우를 보면 Fig. 10 (a)는 공진점에서의 입력 진폭에 대한 출력 진폭비가 큰 차이가 없지만 자장을 가한 자성유체의 경우에는 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 10 (b)에서 보면 자장을 가하지 않은 자성유체가 유체가 없는 경우에 비하여 63% 감소하였고, 자장을 가한 자성유체가 유체가 없는 경우에 비하여 77%가 감소하였다. 이는 자장이 가해지면서 자성유체의 입자가 응집하여 질량이 부가되는 것 같은 현상이 나타나기 때문이라고 생각된다.

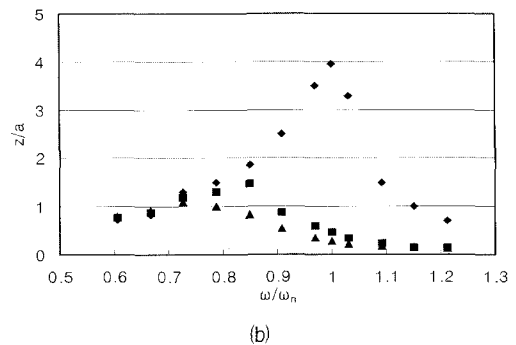
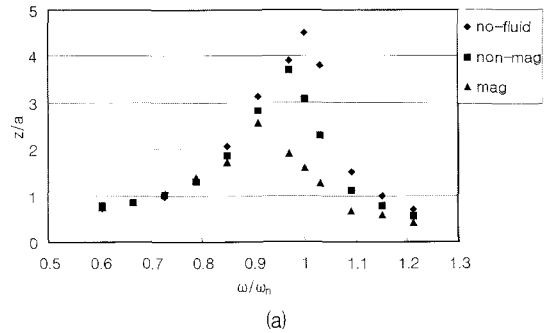


Fig. 10 Amplitude ratio to frequency ratio for (a) $a=2.5 \text{ mm}$, $d=14 \text{ mm}$ and (b) $a=2.5 \text{ mm}$, $d=18 \text{ mm}$

3.4 전자석 입력 전압에 의한 감쇠 영향

점성댐퍼의 작동유체의 적용 및 제어 가능성을 알아보기 위해 전자석의 입력전압에 따른 진동특성을 실험하였다. 영구자석실험에서 감쇠효과가 가장 큰 내부 환봉

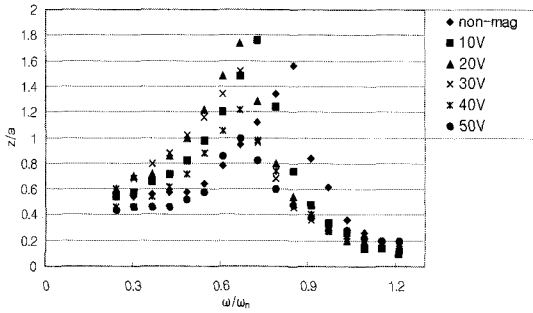


Fig. 11 Amplitude ratio vs. frequency ratio

직경 18 mm, 입력진폭 2.5 mm를 이용하여, 전자석에 직류 전압으로 10~50 V까지 10 V씩 변화를 주었다. 전자석에 전압을 입력한 경우와 자장을 가하지 않은 경우의 진동응답곡선은 Fig. 11에 나타내었다.

전자석에 10 V의 전압을 입력한 경우 공진현상이 일어나는 영역에서 자장을 가하지 않은 경우의 진폭비 1.56보다 12.78%가 증가한 1.76으로 나타났으며, 공진진동수는 자장을 가하지 않은 경우인 진동수비 0.84보다 적은 0.78에서 공진현상이 나타났다.

20 V의 전압을 입력한 경우에는 공진이 일어나는 진동수비가 10 V를 입력했을 때보다 작은 0.67에서 나타나는 것으로 보아 10 V를 입력했을 때보다 자성유체입자의 응집현상이 두드러져 부가질량의 효과로 나타난 것으로 생각된다. 10 V를 입력한 경우와 비교해서 진동수비 0.72 이하에서는 20 V를 입력한 경우가 진폭비가 컸으며 진동수비 0.78 이상에서는 감소하였다.

30 V 입력시 공진이 일어나는 진동수비가 20 V를 입력했을 때와 같은 0.67에서 일어났으며 공진진동수에서의 진폭비는 20 V를 입력한 경우보다 12.6%가 감소하고, 자장을 가하지 않은 경우보다는 2.6%가 감소한 1.52로 나타났다. 이는 자장에 따른 자성유체 입자의 응집이 부가질량효과보다는 점성력의 증가로 나타나 진폭비를 감소시킨 것으로 생각된다.

40 V를 입력시 공진이 일어나는 진동수비는 0.67이 있으며 진동수비 0.72~1.09인 영역에서는 모두 진동감쇠효과를 나타내었다. 또한 모든 진동수영역에서 30 V를 입력한 경우보다 진폭비가 감소함을 알 수 있다.

50 V를 입력한 경우에는 공진진동수에서의 진폭비는 40 V를 입력한 경우보다는 18%가 감소하고, 자장을 가하지 않은 경우보다는 35.9%가 감소한 1.0으로 나타났다.

입력 전압을 가했을 때에 진폭비를 감소시키는 제어 가능한 진동수비 영역을 살펴보면, 10 V입력시는 0.78

(27.23 rad/s)~1.21 (41.9 rad/s)로 나타났으며, 20 V입력시는 10 V를 입력한 경우와 같으나 진폭비는 감소시키는 것으로 나타났다. 30 V입력시는 0.72 (25.13 rad/s)~1.09 (37.70 rad/s)로 나타났으며, 40 V입력시는 0.72 (25.13 rad/s)~1.09 (37.70 rad/s)로 나타났으며 50 V 입력시는 0.72 (25.13 rad/s)~1.03 (35.6 rad/s)로 나타났다.

각각의 입력 전압에서의 진폭비를 비교해보면 10 V와 20 V의 입력 전압에서는 자장이 가해짐에 따라 자성유체입자의 응집이 부가질량의 효과를 나타내며 30 V, 40 V 및 50 V에서는 응집이 점성력의 증가로 나타나 진폭비를 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, 입력 전압이 증가할수록 진폭비의 감소는 현저하게 나타났고 공진진동수비는 0.67의 일정한 값을 나타냈다.

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 입력 진폭이 커질수록 출력 진폭은 커지지만 내부 환봉 직경이 클수록 입력 진폭에 대한 출력 진폭비는 감소한다. 본 연구에서 감쇠 효과는 외부 실린더의 내경 (24 mm)에 대한 내부 환봉 직경의 비가 0.75가 될 때까지 감쇠 효과가 향상됨을 알 수 있다.
- 2) 자장을 가하지 않은 경우에 비해 자장을 가한 자성유체는 내부 직경이 10 mm (a=2.5 mm)인 경우 입력 진폭에 대한 출력 진폭비가 14% 감소하고, 내부 직경이 10 mm (a=2.5 mm)에 비해 14 mm인 경우 20 %, 내부 직경이 14 mm (a=2.5 mm)에 비해 18 mm인 경우에는 65 %가 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 전자석에 입력 전압을 가할 경우 진폭비를 감소시키는 제어 가능한 진동수비 영역은 10 V일 때 0.78~1.21, 20V일 때는 10 V를 입력한 경우와 같으나 진폭비는 감소하였으며 30 V일 때 0.72~1.09, 40 V일 때 0.72 ~1.09, 50 V일 때는 0.72 (25.13 rad/s)~1.03 (35.6 rad/s)로 나타났다.
- 4) 전자석의 입력전압에 대한 진동특성을 살펴보면, 자성유체에 입력 전압이 10 V와 20 V에서는 응집이 부가 질량 효과를 나타내며 30, 40 및 50 V에서는 응집이 점성력의 증가로 나타나 진폭비를 감소시킨다. 전자석 입력 전압이 증가할수록 진폭비의 감소는 현저하게 나타나고 공진진동수비는 0.67로 일정한 값을 나타낸다.

참고문헌

- (1) Nicholas K. Peter, 1992, "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electro-rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 920275
- (2) 이형남, 전운학, 1995, 곡관내 자성유체 PLUG의 진동특성, 한국자동차공학회 논문집, Vol. 3, No. 3
- (3) 式富 荒近角聰新, 1988, 자성류체, 일간공업신문사
- (4) 일본기계학회편, 1990, 기계공학라이브러리 응용편-7. 전자력응용기기의ダイナミックス, コロナ社