

<연구논문>

## 자기유변유체를 이용한 회전 각속력 제어

신성철 · 정재성 · 김정훈 · 이종원\*

한국과학기술원, 기계공학과  
(1999년 4월 21일)

## Control of Rotational Angular Speed using Magneto-rheological Fluid

Sung-Chul Shin, Jae-Sung Jung, Jeong-Hoon Kim and Chong-Won Lee

Department of Mechanical Engineering, KAIST

(Received April 21, 1999)

### 요 약

본 연구에서는 가해지는 자기장에 따라 항복응력이 변하는 자기유변유체를 이용한 제동 장치를 개발하였다. 현재 선진국을 중심으로 활발히 연구되어지는 자기유변유체는, 유체에 가해지는 자기장의 변화에 따라 유체의 항복응력이 변하는데, 이러한 성질을 이용하여 제동력의 정확한 제어가 가능하다. 본 연구에서는 개발된 제동 장치를 이용하여, 외부에서 회전체에 가해지는 토크가 변동할 경우에 회전체의 회전 속력을 일정하게 유지시키는 기능을 구현하였다. 회전체의 회전속력을 측정하여, 비례-적분 피드백 제어를 사용하여 구현하였다. 우선, 실험과 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 개발된 제동 장치의 매개변수값을 구하였고, 이 값을 이용하여 비례-적분 피드백 제어 시뮬레이션 결과를 예측하였다. 또한 초기 각속력이 있는 자유낙하실험, 수동 크랭킹 실험들을 수행하여, 개발된 장치를 통하여 회전체의 회전속력을 일정하게 유지할 수 있음을 확인하였다. 이러한 속력 제한 기능은 개발된 제동 장치의 용용의 한 예로서, 회전체의 적절한 물리량을 측정한 후, 적절한 피드백 제어를 가하면, 얼마든지 원하는 다른 기능을 구현해 낼 수 있다.

**Abstract**—A magneto-rheological(MR) fluid based rotary loading and braking device is developed. The loading and braking forces of the device are accurately adjustable by controlling the yield stress of MR fluid, so that the vibration control, the precision position control and the speed control of rotating machines equipped with the device can be achieved. As an engineering application, constant rotational speed regulation is conducted using the device manufactured in laboratory, introducing PI control action not only with varying torque due to gravitation, with initial angular speed, but also with constant external torque made by hand. To do this, first, mathematical model was obtained via experiments. And then, simulation was carried out, based on the experimentally identified model. Its result was confirmed through experiment. It is identified by simulation and experimental results that PI action leads to satisfactory control performance in both cases that varying torque due to gravitation, with initial angular speed, and constant external torque are applied.

**Keywords:** -Magneto-rheological Fluid, -Rotational Angular Speed Regulation, -PI Control

### 1. 서 론

최근의 회전 기계 기술 분야를 살펴보면, 회전 기계 시스템의 고출력 및 고속 회전과 같은 성능의 향상뿐만 아니라 회전체의 정밀한 위치 및 속도 제어, 부하 변동시의 회전 기계 정속도 유지, 회전 시스템의 운전 중 발생하는 진동의 효과적인 억제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 위해서는 제동력의 제어가 필수적이나, 기존의 제동 장치로는 제동력을 제어하기가 용이하지 못하다. 그리고 마찰을 이용하는 제동 장치에서는, 마찰면에서의 접촉력을 유지시켜주기 위해서 부가적인 장치를 필요로 하는데 이는 반응 속도를 느리게 하는 원인이 될 뿐만 아니라

부피도 커지게 되므로 정밀한 제어가 요구되는 경우나 빠르게 제동력을 조절해야 하는 경우에는 큰 단점으로 작용할 수 있다.

이러한 기존의 제동 장치의 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 가해지는 자기장에 따라 항복응력이 변하는 자기유변유체(Magneto-Rheological Fluid ; MR유체)를 이용한 제동 장치를 개발하였다. 자기유변유체의 항복응력은 유체 내에 형성된 강자성 입자의 체인 형성에 의한 것이며, 형성된 체인의 강도는 자기장의 세기에 따라 달라지므로 가해주는 자기장을 변화시키면 항복응력을 쉽게 조절할 수 있다[1-4]. 따라서 개발된 제동장치는 가해주는 자기장만 조절하면 큰 물리적인 힘을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 기계적 마찰과는 달리 열이나 진동, 소음이 발생하지 않고, 제동력 조절이 용이하며, 반응속도 또한 빠르기 때

\*corresponding author

문에 기존의 제동 장치의 문제들을 해결할 수 있는 새로운 제동 장치로 기대되고 있다[5-9].

본 연구에서는 자기유변유체를 이용한 제동 장치의 실용 방안의 하나로서, 외부에서 토크(Torque)가 가해질 때 회전체의 회전 각속력이 미리 설정한 제한 각속력을 초과하지 못하도록 하는 피드백(Feedback) 제어 시스템을 구현하고자 한다[9].

## 2. 자기유변유체

자기유변유체는  $10^4 \sim 10^3$  cm 크기의 강자성 입자를 포함하는 비콜로이드 용액으로 자기장을 인가하지 않을 경우 상온에서 0.2~0.3 Pa·sec의 점성을 가지며, 150~250 kA/m(2~3kOe)의 자기장이 가해지면 50~100 kPa의 높은 항복응력을 갖는 물질이다[1, 2]. 자기유변유체의 항복응력은 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타내는데, 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되고 또한 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하기가 어려워서 전단속도비를 변화시켜 구한 전단응력값을 직선보간 한 후 전단속도비 값이 0인 부근에서의 절편값을 항복응력으로 고려한다. 이를 동적 항복응력(Dynamic yield stress)이라고도 한다[11].

자기유변유체는 자기 포화에 의한 최대 항복응력의 제한이 있기는 하지만, 10 msec 이내의 빠른 응답 시간을 가지고, 또한 -40~150°C의 넓은 작동 온도범위를 가지며, 유입되는 불순물에 대해서도 상당히 둔감한 특성을 가지고 있어서 많은 공학적 응용분야를 갖는다[1, 2].

## 3. 자기유변유체를 이용한 제동 장치의 구성

본 연구에서 제작된 제동 장치의 구조는 Fig. 1과 같다. 회전축에 부착된 원판 표면과 케이싱 사이의 간극에 자

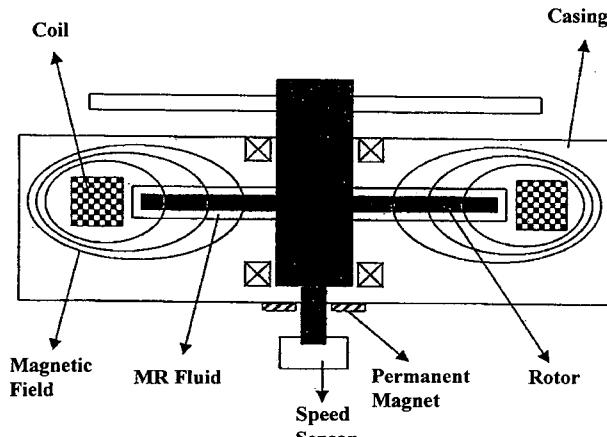


Fig. 1. Loading device using the MR fluid.

기유변유체가 채워져 있으며, 이 자기유변유체에 자기장을 가하는 코일이 솔레노이드 형태로 원판 외주를 따라 감겨져 있다. 이 코일에 전류를 흐르게 하여 자기장이 발생되면, 이 자기장은 코일을 둘러싼 강자성체를 따라 자기유변유체 내로 분포되고, 자기유변유체의 전단 항복응력이 변함으로 인해서 유체가 원판에 가하는 마찰력을 변화시켜, 결국 회전축에 전달된 회전 토크를 감쇠시키는 제어 토크를 발생시킨다. 회전축의 한쪽 끝단에는 회전축의 회전 각속력을 측정하기 위한 속력 센서가 장착되어 있다. 이 센서의 출력 신호가 비교기로 피드백되어 정확한 제동량 및 제동력을 부가할 수 있게 한다. 회전축의 축 하부에는 외부에 영구 자석을 부착하여 회전축의 틈 사이로 유출되는 자기유변유체에 자기장을 가하여 굳어지게 함으로써 자기유변유체의 누설을 막도록 하였다[9].

Fig. 2는 각속력 제한기능을 구현하는 피드백 제어 회로의 구성을 보여준다. 앞서 언급되었듯이, 외부 회전 토크에 의한 회전체의 회전 각속력과 미리 설정한 제한 각속력과의 차이가 제어기와 전압/전류 변환기를 거치면서, 요구되는 제동력에 필요한 크기의 전류로 변환되어 제동 장치에 공급된다. 개발된 제동 장치는 특성상 회전체의 회전 각속력을 증가시키지는 못하고 다만 회전 각속력을 감소시킬 수 있으며, 본 연구에서 구현하고자 하는 기능은 회전체의 회전 각속력이 미리 설정한 제한 각속력을 넘지 않도록 하는 것이므로, 회전체의 회전 각속력이 제한 각속력을 초과한 경우에만 제동 장치에 전류가 흐르도록 제어 회로를 구성하는 것이 효과적이다. 즉, 제한 각속력 이하의 회전 각속력에 대해서는 피드백 제어 회로가 작동하지 않다가 회전 각속력이 제한 각속력을 넘게 되면, 그 때부터 회전 각속력 증가를 억제하는 피드백 제어 회로가 작동하여 전류가 흐르기 시작한다. 제동 장치에 공급되는 전류는 초과된 회전 각속력량에 따라 증가하므로 회전 각속력 초과량이 증가할수록 자기유변유체의 항복응력이 증가하여 회전체의 회전 각속력을 제한 각속력 이하로 억제한다.

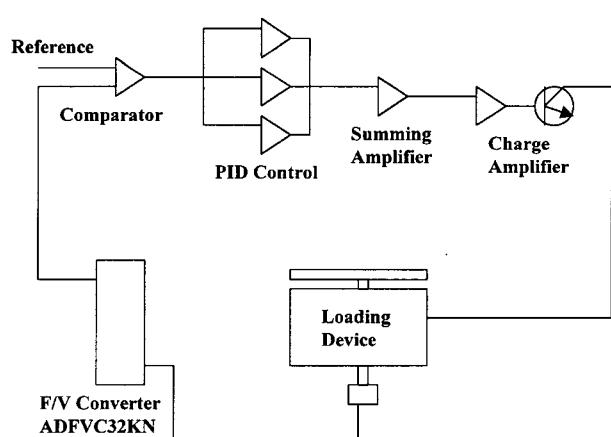


Fig. 2. Circuit diagram of PI controller.

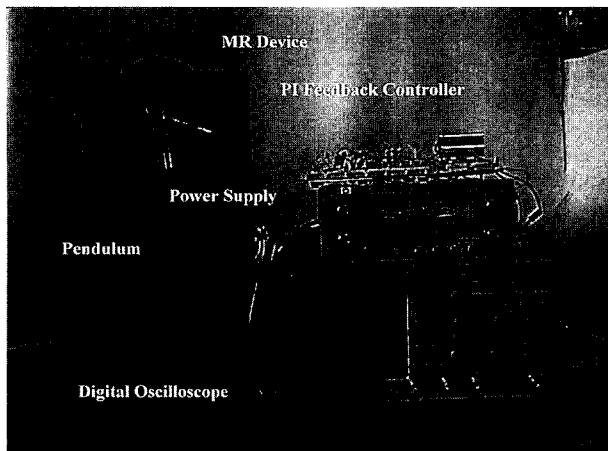


Fig. 3. The experimental setup.

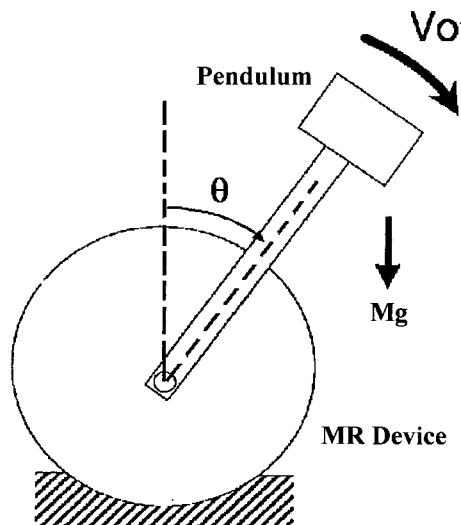


Fig. 4. Scheme of the loading device.

Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에서 제작, 사용된 실험 장치의 사진과 그 모형도를 보여준다. 이 실험 장치를 이용하여, 자기유변유체를 이용한 제동 장치의 수학적 모형화를 위해 초기 각변위를  $30^\circ$ 로 하여 자유 낙하실험을 수행하였다. 또한 회전축에 연결된 강체 진자에 초기 회전 각속력을 주어 중력장에서 낙하시키고 진자를 강제로 수동 크랭킹 운동을 시켜서 비례-적분 피드백 아날로그 제어를 통한 회전 각속력 제한 기능을 확인하였다. 제어된 회전체의 회전 각속력을 디지털 오실로스코프를 이용하여 측정한 후, 디지털 데이터로 저장하였다.

#### 4. 모 형화

##### 4.1. 시스템의 지배 방정식 유도

자기유변유체에 의해 원판에 가해지는 전단응력은 다음과 같이 세 가지 항으로 구성된다.

$$\tau = \tau_0 + \tau_H + \tau_\eta \quad (1)$$

$\tau_0$ 는 장치 내부의 마찰이나 기밀을 위해 사용했던 영구 자석의 자기장 및 잔류 자기장에 의한 자기유변유체의 초기 전단 항복응력이다.  $\tau_H$ 는 제어 전류에 의해 발생된 자기장이 유체에 가해짐으로써 생기는 제어 전단 항복응력이다. 이 제어 전단 항복응력은 유체 내부의 강자성 입자가 외부에서 인가된 자기장에 의해 체인을 형성하면서 생기게 되며, 이 값은 원판의 회전 속력과 무관하고, 인가되는 자기장에 의해 결정되는 값이다. 자기유변유체에 가해지는 자기장  $H$ 와 발생되는 전단 항복응력  $\tau_H$  사이의 관계는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\tau_H = aH^x \quad (2)$$

본 실험에서 사용한 자기유변유체는  $x=1.89$ ,  $a=2.37 \times 10^{-8}$ 의 값을 가진다[2].

자기유변유체에 가해지는 자기장은 전류가 흐르는 코일에 의해서 발생되며 실험 장치내의 코일에 흐르는 전류와 이 전류에 의해 발생되는 자기장은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$H_M L_M + H_S L_S = NI \quad (3)$$

여기서,  $H$ 는 자기장,  $L$ 은 자기장이 지나가는 경로의 길이,  $N$ 은 코일을 감은 수,  $I$ 는 코일에 흐르는 전류를 나타내며, 첨자  $M$ ,  $S$ 는 각각 자기유변유체와 철(Steel)을 의미한다. 여기에서 자기유변유체의 상태 투자율은 보통  $3\sim 5$  정도로서 철에 비해 매우 작기 때문에, 위 식은 다음과 같은 형태로 근사화 될 수 있다.

$$H_M L_M \approx NI \quad (4)$$

코일에 흐르는 전류  $I$ 는 정속력 유지를 위한 피드백 제어 회로에 의해 회전축의 회전 각속력, 즉  $\dot{\theta}$ 에 비례하므로 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$I = \begin{cases} k(\dot{\theta} - \dot{\theta}_0), & \text{for } \dot{\theta} \geq \dot{\theta}_0 \\ 0, & \text{for } \dot{\theta} < \dot{\theta}_0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $\dot{\theta}_0$ 은 설정 제한 각속력이다.

위의 세 식 (2), (4), (5)를 정리하면, 회전 각속력과 제어 전단 항복응력 사이에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\tau_H = a \left( \frac{N}{L_M} k \right)^x (\dot{\theta} - \dot{\theta}_0)^x, \text{ for } \dot{\theta} \geq \dot{\theta}_0 \quad (6)$$

자기유변유체에 의해 원판에 가해지는 전단응력 중 세 번째로 자기유변유체의 점성에 의해 발생하는 점성마찰에 의한 전단응력  $\tau_\eta$ 가 있다. 이 값은 회전축의 회전 각속력에 비례하는 값으로 다음과 같다.

$$\tau_\eta = \eta \frac{r}{d} \dot{\theta} \quad (7)$$

여기서  $\eta$ 는 자기유변유체의 점성 계수이고,  $r$ 과  $d$ 는 각각 축에서부터의 반지름과 유체 사이의 간극을 나타낸다.

위에서 말한 세 가지의 전단응력을 전체 원판에 대해 적분한 값과 실험 장치의 관성 모멘트 그리고 외부에서 가해주는 토크를 고려해주면 다음과 같은 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} + \alpha\dot{\theta} + \beta(\dot{\theta} - \dot{\theta}_0)^x + T_0 \text{sign}(\dot{\theta}) \\ = MgR\sin\theta \quad \text{for } \dot{\theta} \geq \dot{\theta}_0 \\ J\ddot{\theta} + \alpha\dot{\theta} + T_0 \text{sign}(\dot{\theta}) = MgR\sin\theta \quad \text{for } \dot{\theta} < \dot{\theta}_0 \end{aligned} \quad (8)$$

식에서  $M$ ,  $R$ ,  $g$ 는 각각 강체 진자의 질량, 반지름 그리고 중력 상수를 나타내며, 상수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $T_0$ 는 다음과 같다.

$$\alpha = \int \eta \frac{r^2}{d} dA, \quad \beta = \int a \left( \frac{N}{L_M} k \right)^x r dA, \quad T_0 = \int \tau_0 r dA \quad (9)$$

식에서 적분 면적은 자기유변유체와 원판의 전 접촉면적이며, 간극은 두 개이므로  $L_M=2d$ 이다. 여기서 원판의 외측 반지름은 49 mm이며, 간극의 크기( $d$ )는 1 mm, 코일의 감은 횟수( $N$ )는 170회이다. 회전 각속력 제어를 위해 가해지는 제어 토크의 영향이  $\beta(\dot{\theta} - \dot{\theta}_0)^x$ 로 나타나는데, 이것은 외부에서 가해지는 토크에 의해 회전축의 회전 각속력이 제한 각속력을 초과하게 될 때, 그 초과량의  $x$ 승 만큼에 비례하는 제어 토크가 가해짐을 의미한다.  $x$  값이 제곱에 가까우므로 회전 각속력  $\dot{\theta}$ 와  $\dot{\theta}_0$ 의 차이가 커질수록 이러한 효과는 크게 증대되며, 회전 각속력의 초과량이 더욱 더 억제되는 효과가 나타난다.

#### 4.2. 시스템 매개변수 추정

앞에서 구한 지배 방정식이 이 실험 장치의 운동을 정확히 설명할 수 있는지를 검증하기 위해서 실험 데이터에 가장 적합한 지배 방정식의 상수 값들을 실험 결과와 잘 일치하도록 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J = 0.05[\text{kg} \cdot \text{m}^2], \quad \alpha = 6.7 \times 10^{-3}[\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}], \\ T_0 = 0.64[\text{N} \cdot \text{m}], \quad MRg = 1.889[\text{N} \cdot \text{m}] \end{aligned} \quad (10)$$

시스템의 매개변수는 식 (9)를 통하여 구한 값과 실험을 통해 구한 매개변수 값과 비교했을 때 크게 차이가 없었다. 다만 자기유변유체의 공기중의 노출이나 응고 등에 의한 효과로  $\alpha$ 의 실험값이 계산값보다 다소 크게 나타났다. (10)식의 매개변수 값들을 지배 방정식에 대입하여 얻은 결과인 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 이론적으로 계산한 회전축의 회전 각속력과 실험을 통해 얻은 회전 각속력이 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 식 (8)의 지배 방정식과 식 (10)의 매개변수 값들을 이용하여 개발된 제동장치의 동적거동을 해석 및 예측할 수 있다.

### 5. 회전 각속력 제한 기능 구현

#### 5.1. 시뮬레이션 결과

앞서 구한 자기유변유체를 이용한 제동 장치의 수학적 모델을 이용하여 회전 각속력 제한 기능을 시뮬레이션을 통해 구현해 보았다. 회전축의 회전 각속력 제한 기능을 확인하기 위해 진자에 초기 각속력을 가하여 중력장에서 낙하시킨 경우와, 진자에 일정한 외부 토크를 부가한 경우에 대해 시뮬레이션을 해보면 각각 Fig. 6, Fig. 7과 같이 회전 각속력이 미리 설정한 제한 각속력을 초과하지 않도록

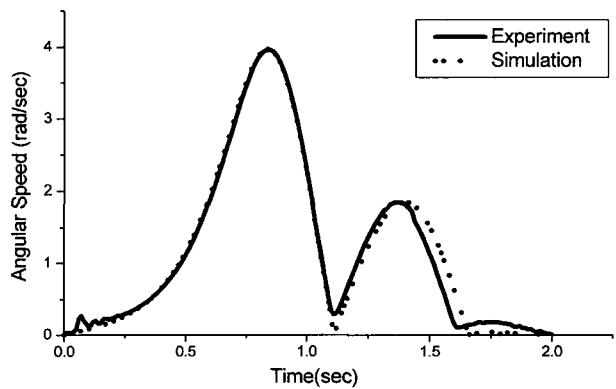


Fig. 5. Angular speed profile without magnetic field.

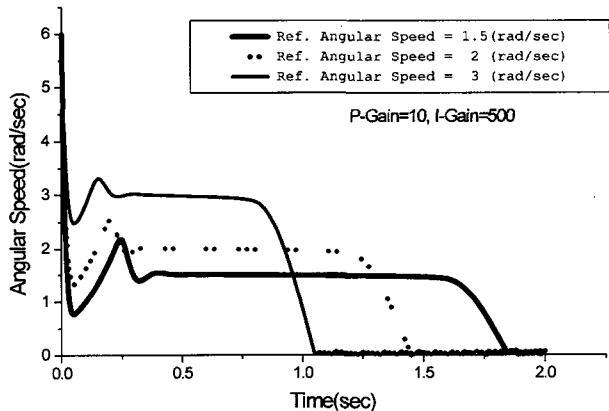


Fig. 6. Simulation of the effect of varying reference angular speed with initial angular speed.

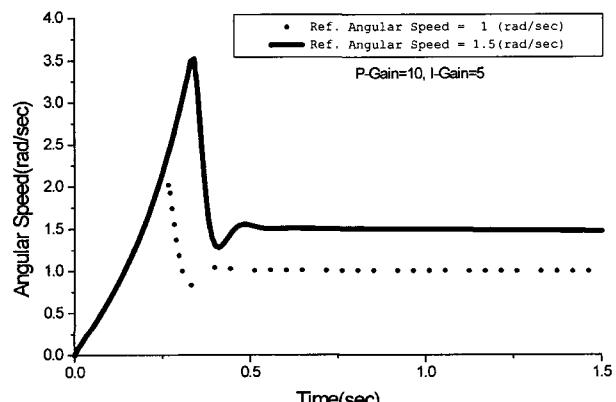


Fig. 7. Simulation of the effect of varying angular speed with constant external torque.

록 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5.2. 실험결과

시뮬레이션을 통해 확인한 자기유변유체를 이용한 제동장치의 성능을 실험을 통하여 다시 재확인하고자 한다. Fig. 8은 강체 진자에 초기 각속력을 주고 제한 각속력을 바꿔가면서 수행한 실험의 결과이다. 그림에서 제한 각속력이 10(rad/sec)일 때는 강체 진자의 최대 각속력이 10(rad/sec)을 넘지 않기 때문에 제어 회로가 작동하지 않고 따라서 회전 각속력을 제한하지 않는다. 그러나 제한 각속력을 낮추어서 강체 진자의 최대 각속력이 제한 각속력보다 크게 될 때는 제어 회로가 작동하여 그림처럼 각속력을 제한 각속력 6.5(rad/sec), 4.3(rad/sec)로 정확하게 제한하고 있음을 알 수 있다. 이제 진자를 수동으로 크랭킹 운동 시키면서 정확한 회전 각속력 제한이 가능한가를 알아보자. Fig. 9는 실험장치의 축에 매달린 강체 진자를 제거하고, 수동으로 축을 크랭킹 운동 시키면서 회전축의 각속력이 제한 각속력보다 커졌을 때, 제동 장치 및 제어기를 작동시켜 회전 각속력 제한이 가능한가를 알아본 실

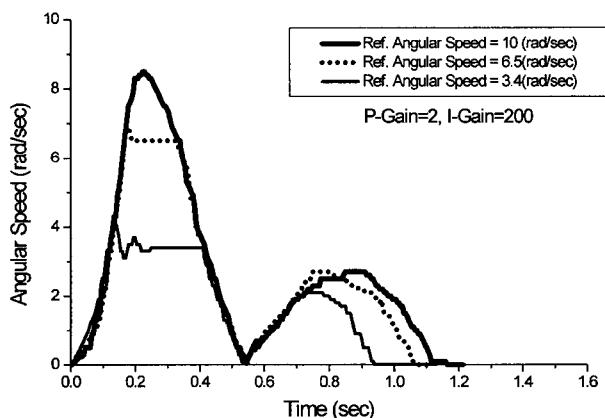


Fig. 8. Experimental result of the effect of varying reference angular speed with initial angular speed.

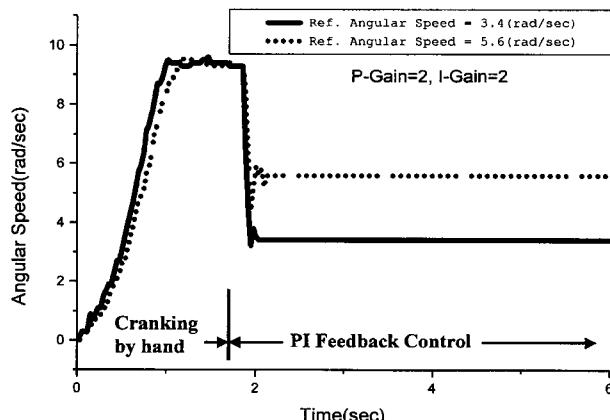


Fig. 9. Experimental result of the effect of varying angular speed with constant external torque.

험 결과이다. Fig. 9를 보면 약 1.7초 까지는 제어를 하지 않으면서 축을 수동으로 크랭킹 운동 시키면 점차 속력이 붙어 정상상태를 유지하게 된다. 이때 비례-적분제어기를 작동시키면, 빠른 시간 사이에 각속력이 제한 각속력 5.6(rad/sec), 3.4(rad/sec)로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서의 시뮬레이션 결과와 같은 것이다.

## 6. 결 롬

자기유변유체를 이용한 제동 장치를 개발하고, 비례-적분제어를 적용하여 회전 각속력 제한 기능을 구현하였다. 이를 위해 자기유변유체를 이용한 제동 장치의 수학적 모델을 유도한 후, 매개변수들을 실험적으로 구하였다. 수학적 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해서, 회전축에 연결된 강체 진자가 초기 각속력을 가지고 중력장에서 낙하하는 경우와 회전축에 일정한 토크가 가해지는 경우에 비례-적분 피드백 제어로써 회전 각속력을 제한할 수 있음을 확인하였고, 실험을 통해서도 이를 확인하였다. 이러한 회전 각속력 제한 제동 장치는 공작기계를 비롯한 각종 기계 시스템의 회전 각속력 제한을 위해서 적용 가능하고, 특히 유모차 및 유아용 자전거의 안전사고를 예방하는 용도 등으로도 다양하게 적용될 수 있을 것이다.

### 기호설명

- $\eta$  : Viscosity of MR fluid
- $\dot{\gamma}$  : Shear strain rate
- $\tau_0$  : Initial shear stress of the system
- $\tau_H$  : Controllable yield shear stress of MR fluid
- $\tau_\eta$  : Shear stress by the viscosity
- $H$  : Applied magnetic field
- $L$  : Magnetic path
- $N$  : Number of turns
- $I$  : Current input to the system
- $\theta$  : Angular Speed of the rotor
- $\theta_0$  : Reference angular speed
- $r$  : Radius of the rotor
- $d$  : Gap size
- $T$  : External torque
- $M$  : Mass of the pendulum
- $R$  : Length of the arm
- $g$  : Gravitational acceleration

### 참고문헌

1. Lord Corporation, "http://www.mrfluid.com/"
2. 김정훈, "MR유체를 이용한 반자동 마운트의 설계, 제작 및 모델링", 한국과학기술원 기계공학과 석사논문 (1996).
3. U.S. Patent No.5284330, "Magneto-rheological Fluid Devices"

- (1994).
4. Weiss Keith D., Duclos Theodore G., Carlson J. David, Chrzan Michael J. and Margida Anthony J., "High Strength Magneto- and Electro-rheological Fluid", SAE Paper, 932451.
  5. Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender, and J. David Carlson, "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids", SPIE 5th Annual Int Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA (1998).
  6. J. D. Carlson, D. N. Catanzarite and K. A. St Clair, "Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices", Proceedings 5th Int. Conf. on ER Fluids, MR Suspensions and Associated Technology, W. Bullough, Ed., World Scientific, Singapore (1996) pp. 20-28.
  7. J. D. Carlson and K. D. Weiss, "A Growing Attraction To Magnetic Fluids", Machine Design, Aug. 8 (1994) pp. 61-66.
  8. K. D. Weiss, J. D. Carlson and D. A. Nixon, "Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluids", Journal of Intelligent Material Systems and Structures (1994) Vol. 5, pp. 772-775.
  9. J. H. Kim, C. W. Lee and S. K. Lee, "Modeling of Magneto-rheological Fluid Based Semi-active Mount", Proceedings 3rd Int. Conf. on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan (1996) Vol. 3, pp. 164-169.
  10. 이종원, 김정훈, 정재성, "자기유변유체를 이용한 제동 장치 겸 용 제동 장치", 특허출원 제 65607호 (1997).
  11. 이호근, 임준식, 최승복, 강윤수, 서문석, 신민재, "전극 간극, 길이 및 재질에 따른 가변 ER댐퍼의 댐핑력 특성", 한국자동차 공학회 논문집 (1999) Vol. 7, No. 2.