

PID 제어를 이용한 원통형 ER 클러치의 각속도

제어에 관한 연구

A Study On Control of Cylindrical ER Clutch Using PID control

김대영*(부산대학교 대학원), 이은준(부산대학교 대학원), 주동우(양산대학 자동차과),

박명관(부산대학교 기계공학부)

D. Y .Kim* and E. J. Rhee and D. W. Joo and M. K. Park

Abstract : In this paper a clutch using ER Fluids is called ER Clutch. An experiment of ER Clutch using PID control is performed. In this way the validity of ER Clutch was verified.

Keywords: ER-fluid(ER 유체), ER-clutch(ER 클러치), PID control(PID 제어)

I. 서론

ER유체란 Electro-Rheological Fluid로 전기장이 가해짐에 따라 그 유체의 점성이 변화하는 유체를 말하는데, ER유체의 이러한 특성을 이용하여 브레이크나 클러치 등의 동력전달 장치를 만들어 보고자 하는 연구가 일본이나 미국등의 선진국에서는 이미 오래전부터 활발히 이루어지고 있다.

이전에는 동력원으로부터 발생하는 회전토크를 필요한 기계요소로 전달시키기 위해 클러치나 치차, 벨트 등의 기계요소를 사용하기 때문에 소음이나 진동, 부품의 마모 등의 문제를 야기 시킬 수 있으며 다양한 동력전달의 요구조건을 만족시키기 위하여 동력전달 장치의 구조가 매우 복잡해지고, 이러한 복잡한 구조는 갖은 고장의 원인이 되기도 한다. 하지만 동력전달장치의 설계에 있어서 ER유체를 이용한다면, 진동, 소음, 부품의 마모가 현저히 줄고 장치의 단순화를 가져와 텔레로봇의 감쇠요소 및 마이크로시스템 등에 널리 사용이 가능할 것이다.

만약 ER유체가 클러치나 브레이크 같은 커플링 장치로 사용된다면, 이러한 장치의 출력조절의 가능성이 문제시되는데, 입력축과 출력축 사이의 전기장의 형성은 ER유체의 점성을 변화시키고, 결과적으로 브레이크의 토크 출력과 클러치의 각속도를 변화시킬 것이다. 본 논문에서는 ER유체를 사용하여 클러치를 설계, 제작하고 그 성능을 평가해 봄으로써 전기장 인가에 따른 ER효과를 확인하고 전기점성 유체의 특성을 고찰하여 전기점성 유체를 사용한 동력전달 장치의 최적 설계기준을 마련하고, 이러한 장치의 구현 가능성을 제시하고자 한다. 그리고 특히 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 대표적인 제어인 PID제어기법을 이용하여 ER클러치의 각속도 제어 실험을 시행하였다.

II. 본론

1. ER유체의 기본성질

ER유체는 전기장 비인가 시에는 전단응력 τ 이 전단속도(shear rate) $\dot{\gamma}$ 에 비례하는 뉴턴 유체(Newtonian fluid)적인 거동을 하지만, 전기장을 인가하면 점성계수와 τ 와 $\dot{\gamma}$ 의 관계는 다음과 같이 근사된다.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_{ER} \quad \text{----(1)}$$

여기서 μ 는 전기장 비인가 시의 점성계수이고, 유체에 가해지는 전단응력이 τ_{ER} 보다 약한 경우에는 ER유체는 고체와 같이 거동하고, τ_{ER} 보다 강한 전단응력을 가하면 유동하기 시작한다. 이러한 의미로 τ_{ER} 을 항복응력(yield stress)이라 하고, 이 같은 소성유동(plastic flow)을 하는 유체를 빙햄유체(Bingham fluid)라 한다. 따라서 ER유체는 전기장을 인가하면 빙햄유체적인 거동을 나타낸다. 항복응력은 전단속도에 관계없이 거의 일정하고 전기장 세기(E)의 제곱에 비례하여 변화하는 특성을 나타낸다. 인가되는 전기장의 세기에 따라 얻어지는 항복응력은 사용하는 ER유체의 종류에 따라 차이가 크다. 전기장에 의해 변화하는 점성계수를 α 라 하면

$$\tau_{ER} = \alpha(E)^2, \alpha=4.532 \quad \text{----(2)}$$

로 근사된다. ER유체에서 ER효과는 전단속도가 상승하여도 손실되지 않는 특징이 있다.

실험에 사용한 ER유체는 일본축매사에서 제작한 TX-ER8이며 Fig.2와 같이 전기장 세기에 따른 항복응력 특성을 가진다.

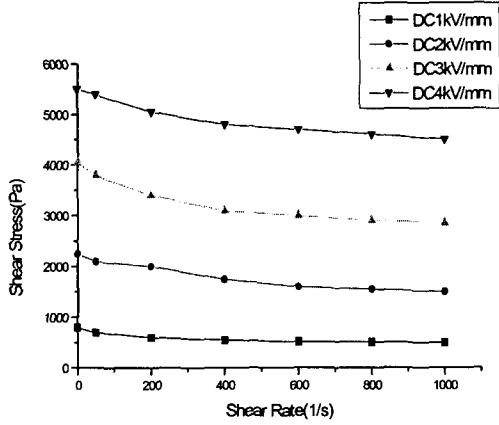


Fig. 1 Shear stress and shear rate of TX-ER8

2. 동력전달 장치의 이론적 배경

ER 클러치는 내부에 있는 매개체를 통해서 입력축의 토크와 속도를 출력축으로 전달해 주는 장치로써, ER 클러치는 내부에 있는 ER유체의 전단응력을 이용한다. 전기장 인가에 의해 발생하는 유체의 전단응력의 증가로 발생하는 토크는 출력축의 회전에 영향을 주게되며 그 관계는 다음의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} = T(t) \quad \text{----(3)}$$

또, $\dot{\theta} = \omega$ 이므로

$$I\dot{\omega}(t) + C\omega(t) = T(t) \quad \text{----(4)}$$

여기서 I 는 중량에 의한 관성능률이고 C 는 점성마찰계수이다.

그러므로 전기장 인가에 의한 토크에 대해 발생하는 출력축의 각속도의 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\omega(s)}{T(s)} = \frac{1}{Is + C} \quad \text{----(5)}$$

전체 토크 $T(t)$ 는 ER유체의 점성저항 의한 점성토크와 전기장의 세기에 의해 발생하는 ER토크의 합이고, 이것은 ER유체의 전체 전단응력 τ_w 에 응력이 작용하는 면의 면적과 축중심에서 그 면까지의 거리의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$T(t) = T_v + T_{ER} = \tau_w \cdot 2\pi r l^2 \quad \text{----(6)}$$

3. ER클러치의 형상

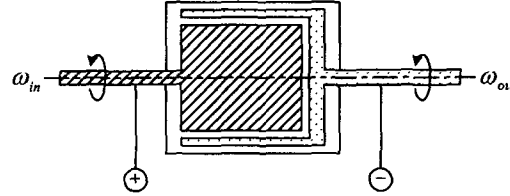


Fig. 2 Cross section of the ER Clutch

본 연구에서는 위의 그림과 같이 실린더형의 ER클러치를 제작·사용하였으며, 이러한 실린더형의 ER클러치는 디스크 타입보다 효율이 좋고 더욱 부피가 작게 설계할 수 있다. 그리고 내부 실린더가 구동축일 때 더욱 더 큰 효율을 얻을 수 있다.

4. PID제어의 Simulation

Fig.3 은 이 시스템의 블록선도를 나타낸 것이다.

먼저, 앞에서 제시된 ER클러치의 각속도 전달함수를 이용하여 입력reference와 출력 reference와의 관계를 simulation해 보았다.

이 논문에서 제시된 ER클러치의 출력축의 관성능률 $I=0.0003049kg \cdot m^2$ 이고, 점성마찰계수 $C=0.00046251N \cdot m \cdot s$ 이므로 이 값을 (4)식에 대입하고, 출력축의 주어진 수치대로 (6)식으로 $T(t)$ 를 구해 (4)식에 대입하면 전달 방정식은 다음과 같이 된다.

$$0.0003049\dot{\omega}(t) + 0.0000003\omega(t) = 0.00012164 \tau_w \quad \text{----(7)}$$

(7)식을 이용하여 PID제어시 시간에 따른 임의의 입력 각속도값과 ER클러치에 의한 출력 각속도값을 simulation하여 비교하면 다음과 같다.

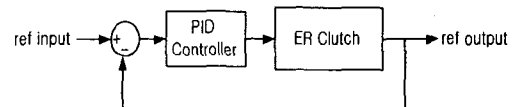


Fig 3. The Block Diagram of This System

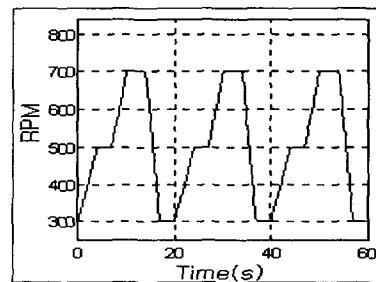


Fig.4 PID제어시 입력 각속도

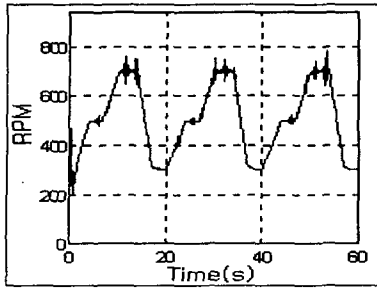


Fig. 5 PID제어시 출력 각속도

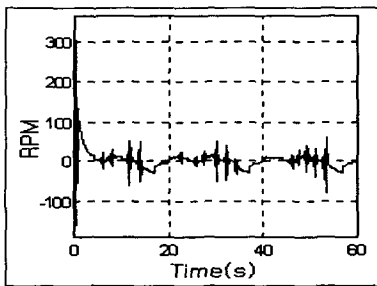


Fig. 6 시간에 따른 입출력 각속도의 차

Fig. 4, 5에서 가로축은 시간(s), 세로축은 각각 입력측과 출력측의 RPM값을 나타낸다.

이 수치시뮬레이션 결과에서 PID제어시 ER클러치에 의한 출력 각속도는 입력 각속도를 잘 추적함을 볼 수 있다. 즉 제어된 ER클러치는 전기장의 인가만으로 토크를 발생시켜 동력전달이 가능하며 비교적 간단한 PID 제어를 설계하여 각속도의 제어를 수행하였을 경우 우수한 성능의 각속도 제어가 가능함을 알 수 있다.

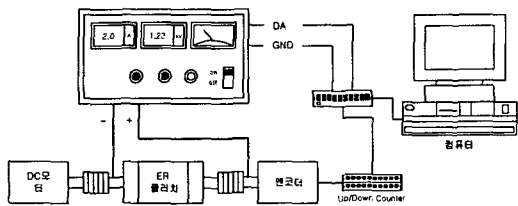


Fig 7. Experimental set-up for RPM measurement

5. 각속도 측정 및 PID를 이용한 디지털 제어

Fig. 7은 실험에서 사용한 장치 구성도를 보여준다. 엔코더에서 나오는 신호를 counter 회로에서 측정한다. 실험에서는 출력측 각속도 $\omega(t)$ 를 태코미터와 같은 각속도 센서를 사용하지 않고 로터리 엔코더의 각변위 센서를 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$\omega(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{T}$$

여기서 T는 샘플링주기를 말한다. 샘플링 주기 T는 타이머 모드를 세팅함으로써 결정할 수 있다.

비례-적분-미분 디지털 제어기의 전달함수 $D(z)$ 와 제어입력 $u(k)$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D(z) &= \frac{u(z)}{e(z)} = K_p + K_i \frac{z}{z-1} + K_d \frac{z-1}{z} \\ &= \frac{(K_p + K_i + K_d)z^2 - (K_p + 2K_d)z + K_d}{z^2 - z} \end{aligned} \quad \text{---(8)}$$

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + (K_p + K_i + K_d)e(k) \\ &\quad - (K_p + 2K_d)e(k-1) + K_d e(k-2) \end{aligned} \quad \text{---(9)}$$

식(8), 식(9)에 표시된 제어입력 $u(k)$ 는 컴퓨터에 내장된 PCL-818 카드에서 D/A 변환되어 아날로그 제어입력 $u(t)$ 로 변환된다. 이 제어입력 $u(t)$ 는 전압이 미약하여 ER클러치를 구동시킬 수 없다. 그래서 $u(t)$ 에 비례하여 전압을 증폭시키는 고전압 발생장치를 통하여 실제 ER클러치를 구동시키는 제어입력 $u_p(t)$ 를 만든다.

6. 실험결과

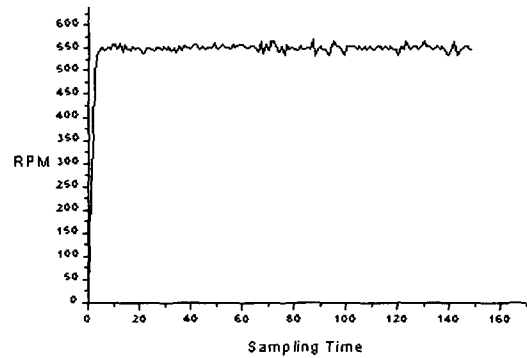


Fig. 8 Experiment Results

Fig. 8은 PID제어기에 의한 ER클러치의 각속도 제어결과이다. 이때 제어제인은 $K_p=5$, $K_d=0.11$, $K_i=0.0001$ 이고 실험의 샘플링 타임은 20ms이다. 따라서 정상상태까지 2초이내에 추종하고 있다.

III. 결론

본 연구는 전기장의 세기의 변화에 따라 점성이 변화하는 전기점성 유체를 이용한 동력전달 장치를 설계 및 제작하여, 전기장의 변화만으로 원하는 각속도로 동력을 전달할 수 있는 새로운 개념의 동력전달 장치를 제시하고, PID 제어를 이용해 제어를 수행하였다.

실험을 통해 ER효과를 전기장 E의 함수로 표현하였고, 지배방정식을 도출하였다. ER클러치의 각속도는 엔코드를 통하여 측정하였으며 구동축과 종속축의 각속도의 차를 보상하기 위해 PID 제어기를 설계, 각속도 제어를 수행하였다. ER유체의 빠른 응답특성과 저소음성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. TAO, "Electro-Rheological Fluids And Magneto-Rheological Suspensions", World Scientific, pp.603-610. 1999
- [2] R. TAO, "Electro-Rheological Fluids And Magneto-Rheological Suspensions", World Scientific, pp.743-750. 1999
- [3] R. TAO, "Electro-Rheological Fluids And Magneto-Rheological Suspensions", World Scientific, pp.759-766. 1999
- [4] A.R.Johnson, "Electro Rheological fluid", pp.424, 1994
- [5] 이우섭, 김태균, "자기장 및 유동 해석을 이용한 자기유변 클러치의 성능 예측 및 검증" 대한기계학회 논문집 A권, 제 24권 제 8호, pp. 2143~2150, 2000
- [6] 김형규, 임수철, 최승복, 박영필, "ER 유체를 이용한 CD-ROM 피딩 시스템의 진동제어" The Korean Journal of Rheology, Vol.11, NO.2, June 1999 pp. 97-104
- [7] 이우섭, 김태균, 허남건, 전도영, "자기장 및 유동 해석을 이용한 자기유변 클러치의 성능 예측 및 검증", 대한기계학회 논문집 A권, 제24권 제8호. pp. 2143~2150, 2000
- [8] V. ORAVSKY, "Dissipation of Energy in a Concentric ER Clutch and Its Refined quasi-static Model, International Journal of Modern Physics B Vol. 13 Nos. 14, 15 & 16 (1999) 2109-2118