

동일한 간극을 갖고 있는 ER 및 MR 클러치의 성능 비교

홍성룡* · 최승복**
(1999년 2월 9일 접수)

Performance Comparison Between ER and MR Clutches with Same Gap Size

Sung-Ryong Hong and Seung-Bok Choi

Key Words : Electro-Rheological Fluid(전기유동유체), Magneto-Rheological Fluid(자기유동유체), Bingham Model(빙햄모델), Gap Size(간극), ER Clutch(ER 클러치), MR Clutch(MR 클러치), Torque Control(토크 제어)

Abstract

In this work, ER(electro-rheological) clutch and MR(magneto-rheological) clutch are devised and their performance characteristics such as response time and controllability are compared. As a first step, field-dependent yield stresses of ER and MR fluids are distilled in shear mode. For reasonable comparison between two clutches, a nondimensional design model is established by choosing same design parameters of gap size and number. Following the manufacturing of two clutches, field-dependent torque level, response time to step input, mechanical power generation to electric power consumption are experimentally measured and compared. In addition, in order to investigate torque controllability of the clutches a sliding mode controller is formulated and experimentally realized. Control bandwidths of two clutches are identified and tracking control responses for desired torque trajectories are presented.

1. 서론

ER(electro-rheological) 유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 말하며, 기본적으로 비전도성 용매에 전도성을 갖는 입자들을 분산시킨 콜로이드(colloidal) 용액이다. ER 유체는 전기장 무부하 시 랜덤 구조를 갖고 있는 뉴토니안유체 특성을 갖지만, 전기장 부하 시 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체로 변하게 된다.⁽¹⁾ ER 유체는 액상이나 고상으로 빨리 변화하는 가역적인 유동성질을 가지고 있고 전기장의 세기로 항복전단응력을 연속적으로 변화시킬 수 있다. 이러한 ER 유체의 특성을 응용한 장치는 단순한 설계, 낮은 제조단가, 무소음, 무진동, 빠른 응답특성, 연속 제어성능, 작은 전력 소모량 등의 장점을 가지고 있다. 이들 장점을 이용하여 지능 구조물, 진동제어용 댐퍼, 엔진마운트, 클러

치, 브레이크, 밸브 등 여러 분야에 응용이 시도되고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 한편, MR (magneto-rheological) 유체는 자기장 부하에 의하여 ER 유체가 가지는 역학적 특성을 가질 수 있으며, 낮은 투자율(permeability)의 용매에 상자성(paramagnetic) 입자를 분산시킨 용액이다. MR 유체의 응용장치는 ER 유체의 응용범위와 유사하며, 댐퍼, 마운트, 브레이크 등에 응용되어 상용화 단계에 이르고 있다.⁽⁵⁾

ER 및 MR 유체 응용장치의 성능을 좌우하는 중요 성분은 ER 및 MR 유체의 특성, 설계메커니즘, 제어로직, 주변 전력공급장치 등이 있다. MR 유체 응용장치는 ER 유체 응용장치의 간단한 전극 설계와는 달리 자기장 형성을 위한 자기회로의 설계를 필요로 한다. 자기회로의 설계는 인덕턴스와 MR 유체에 부하 되는 자기장의 방향 등에 영향을 준다. 즉, 자기회로의 설계가 MR 유체 응용장치의 성능을 좌우할 수 있다. 현재 개발된 MR 유체의 항복전단응력은 ER 유체에 비하여 매우 높은 것으로 보고 되고 있다. 따라서, MR 유체 응

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 인하대학교 기계공학과

용장치는 ER 유체 응용장치에 비하여 소형화가 가능하다. MR 유체 응용장치의 응답속도는 자기장에 대한 MR 유체의 응답속도, 자기회로의 응답속도, 주변 전력공급장치의 시간지연에 의하여 결정된다. 한편, ER 유체 응용장치의 응답속도는 전기장에 대한 ER 유체의 응답속도와 주변 전력공급장치의 시간지연에 의존한다. 따라서 ER 유체를 이용한 응용장치의 응답속도가 MR 유체 응용장치의 경우보다 빠른 것으로 알려져 있다. 이와 같이 ER 유체와 MR 유체의 장단점이 명확히 나타나 있음에도 불구하고 동일 응용장치를 대상으로 여러 가지 특성의 정량적인 비교 연구를 수행한 보고는 국내외적으로 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구의 목적은 동일한 설계구속조건을 바탕으로 제작된 ER 및 MR 클러치의 토크전달, 응답속도, 토크제어 등 여러 가지 성능 특성을 실험적으로 비교 분석하여 향후 이들 유체를 이용한 응용장치 개발과 실용화에 유용한 데이터 및 방향을 제시하고자 한다.

이를 위해 우선 ER 및 MR 유체의 빙햄모델을 실험적으로 도출하였다. 본 연구에서 선정된 ER 및 MR 클러치는 상대운동을 하고 있는 두 판 사이에 전기장 혹은 자기장이 수직으로 통과하기 때문에 전단모드(shear mode)를 이용한 빙햄모델이 필요하다.⁽⁶⁾ 단판 디스크 형 클러치의 기하학적 형상과 회전속도를 설계변수로 하여 무차원 모델을 구성하였으며, 이를 바탕으로 클러치의 성능해석을 수행한 후 클러치를 제작하였다. 두 클러치의 성능특성을 비교하기 위하여 전기장 혹은 자기장의 세기에 따른 전달 토크의 크기, 응답속도, 전력소모에 대한 동력전달, 그리고 슬라이딩모드제어를 통한 토크추적제어 성능 등을 실험적으로 고찰하였다.

2. ER 및 MR 유체의 빙햄 특성

전단모드에서의 ER 및 MR 유체의 거동은 일반적으로 다음과 같은 빙햄모델로 표현할 수 있다.⁽¹⁾

$$\tau = \tau_y(F) + \eta\dot{\gamma}, \quad \tau_y(F) = \alpha F^\beta \quad (1)$$

여기서, τ 는 ER 및 MR 유체의 전단응력을 나타내며, η 는 ER 및 MR 유체의 기본점성계수이고, $\dot{\gamma}$ 는 전단비이다. F 는 ER 유체의 경우 부하전압에 비례하는 전기장 E 이며, MR 유체의 경우 전류에 비례하는 자기장 H 이다. $\tau_y(F)$ 는 ER 및 MR

유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로서, F 의 증가와 더불어 증가한다. ER 및 MR 유체의 항복전단응력은 외부에서 전기장이나 자기장이 가해질 때 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타낸다. 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되고 또한 복잡한 거동을 하기 때문에 항복전단응력을 정확히 측정하는 것은 어렵다. 따라서, 전단비를 변화하면서 측정한 전단응력을 이용하여 구한 선형식에서 전단비가 영(zero)일 때의 전단응력을 동적항복응력(dynamic yield stress)으로 정의한다.⁽⁷⁾ 일반적으로, 동적항복응력이 ER 및 MR 유체의 항복전단응력으로 취급되며, 전기장이나 자기장의 세기에 대한 지수함수로 표현된다. 이 때 구하는 비례상수 α 와 지수 β 는 ER 및 MR 유체에 사용된 용매와 입자의 종류, 조성비, 조성환경 등에 의하여 결정되는 고유 특성치이다.

본 연구에서 사용한 ER 유체는 화학적으로 특수처리된 전분과 20cs 실리콘 오일을 이용하여 자체 조성하였으며, 입자중량비는 30%이다. MR 유체는 미국 Lord사에서 제조한 것으로 Carbonyl 철분과 Hydrocarbon 오일을 합성한 것으로 입자체적비는 32%이다. Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에서 사용된 ER 및 MR 유체 빙햄특성을 각각 나타낸다. 제안된 클러치의 작동모드가 전단모드이기 때문에 회전형 점도계를 사용하여 빙햄거동을 측정하였으며, 작동온도는 상온(25°C)으로 설정하였다. 이러한 결과를 수식 (1)을 이용하여 항복전단응력으로 표현하면 다음과 같다.

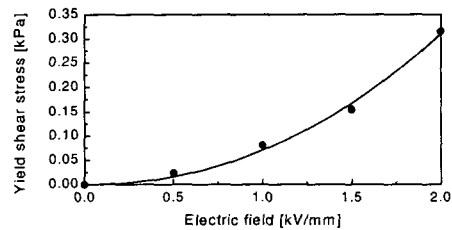


Fig. 1 Bingham characteristics of employed ER fluid.

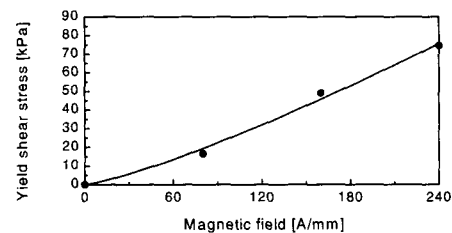


Fig. 2 Bingham characteristics of employed MR fluid.

$$\tau_y(E) = 0.07E^{2.1} \text{ (ER 유체)} \quad (2)$$

$$\tau_y(H) = 0.06H^{1.3} \text{ (MR 유체)} \quad (3)$$

여기서, τ_y 의 단위는 kPa, E 의 단위는 kV/mm, H 의 단위는 A/mm이다. ER 유체와 MR 유체의 기본점성계수는 각각 0.08Pa·s와 0.2Pa·s이다.

3. 클러치의 설계 및 제작

본 연구에서 설계한 단판 디스크 형 ER 및 MR 클러치의 기하학적 형상은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다. ER 클러치의 단순한 전극 설계와는 달리 MR 클러치는 자로(flux guide)와 솔레노이드를 고려하여야 함을 알 수 있다. ER 및 MR 클러치가 전달할 수 있는 토크의 크기는 ER 및 MR 유체가 가질 수 있는 전단응력을 접촉면적에 곱하고 디스크의 반지름(r)에 대하여 적분을 수행하여 구할 수 있으며, 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_T &= T_c + T_\eta \\ &= N \int_{R_i}^{R_o} 2\pi(\tau_y(F) + \eta f) r^2 dr \\ &= \frac{2}{3} \pi N \tau_y(F) (R_o^3 - R_i^3) + \frac{N}{h} \pi^2 \eta f (R_o^4 - R_i^4) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, T_c 는 전기장이나 자기장 부하 시 발생하는 제어토크(controllable torque), T_η 는 전기장이나 자기장과는 무관한 ER 및 MR 유체의 점성 마찰로 인한 점성토크(viscous torque), T_T 는 제어토크와 점성토크의 합인 전체토크이다. 상대운동을 하는 접촉부에서 발생하는 마찰토크는 설계에 고려하지 않았다. 상기식에서 R_o 는 디스크의 외측 반지름(outer radius), R_i 는 디스크의 내측 반지름(inner radius), h 는 ER 및 MR 유체가 채워져 있는 간극(gap size), N 은 ER 및 MR 유체가 채워져 있는 간극의 수이며, 이 것 들은 ER 및 MR 클러치의 기하학적 설계변수 들이다. 그리고 f 는 입력축과 출력축의 회전속도의 차이다.

식 (4)를 무차원화하면 설계변수 들의 상호관련성을 이해할 수 있으며, 효과적인 설계방법을 제시할 수 있다. 식 (4)를 살펴보면 R_i 는 R_o 보다 작은 값이므로, R_i^3 는 R_o^3 , R_i^4 는 R_o^4 에 비하여 무시할 수 있다. 따라서, 식(4)에는 7개의 설계변수가 있으며, 질량, 길이, 시간 등 3개의 기본차원으로 구성되어 있다. N 은 차원을 갖지 않으므로,

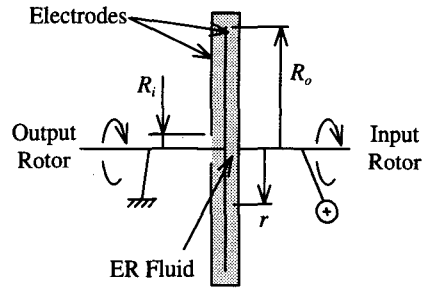


Fig. 3 Geometry of the single-disk type ER clutch.

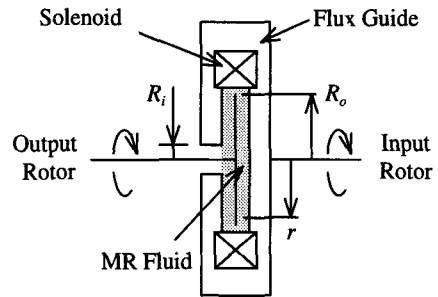


Fig. 4 Geometry of the single-disk type MR clutch.

차원을 가진 6개의 설계변수로부터 3개의 무차원화 된 설계변수와 설계식을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$T_T^* = \frac{T_T}{\eta f h^3}, \quad \tau_y^* = \frac{\tau_y}{\eta f}, \quad R_o^* = \frac{R_o}{h} \quad (5)$$

$$\frac{T_T^*}{N} = \frac{2}{3} \pi \tau_y^* R_o^{*3} + \pi^2 R_o^{*4} \quad (6)$$

식 (5)에서, τ_y^* 는 ER 및 MR 유체의 특성이 지배하는 가장 주요한 설계변수이다. 항복전단응력이 점성에 비하여 클수록 τ_y^* 가 큰 값을 가지게 된다. 즉, 전체토크에서 점성토크의 비중이 작아지게 되며, 전기장이나 자기장의 세기를 이용하여 전체토크의 크기를 제어할 수 있는 영역이 넓어진다. R_o^* 는 기하학적 설계변수로 표현된다. 간극의 크기에 비하여 디스크의 외측반지름이 클수록 더 큰 토크를 전달할 수 있음을 의미한다. T_T^* 는 τ_y^* 와 R_o^* 에 의존하여 ER 및 MR 유체의 특성과 기하학적 설계변수에 직접적으로 영향을 받으며, 간극의 수가 많을 수록 전체토크의 크기를 크게 할 수 있다. 본 연구에서 이용한 ER 및

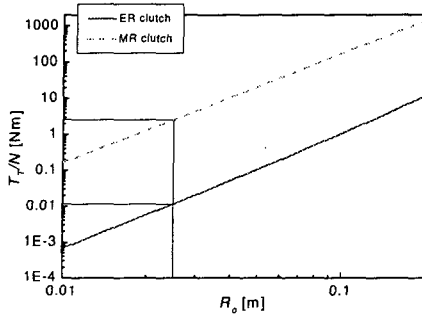


Fig. 5 Relation of T_T/N and R_o at specified τ_y^* .

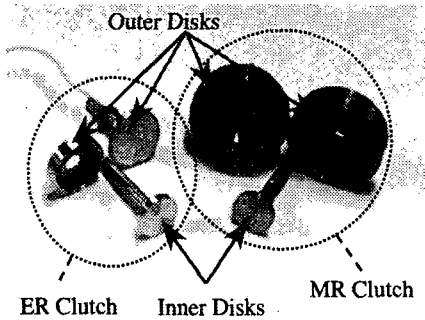


Fig. 6 Components of ER and MR clutches.

MR 유체의 τ_y^* 는 5Hz의 회전속도 차에서 각각 7.75×10^2 과 7.96×10^4 이며, ER 및 MR 유체가 채워져 있는 간극의 크기는 0.001m로 설정하였다. 이를 바탕으로 R_o 와 T_T/N 의 관계를 도시하면 Fig. 5와 같으며, 동일한 R_o 에 대하여 MR 클러치의 토크가 ER 클러치의 그것보다 상당히 큰 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 ER 및 MR 클러치의 성능을 정량적으로 비교하기 위하여 기하학적 설계변수를 동일하게 설정하였다. 또한, 동일한 양의 ER 및 MR 유체가 클러치의 간극에 주입된다. 따라서, ER 및 MR 유체의 특성이 ER 및 MR 클러치의 전달 토크에 미치는 영향을 알아볼 수 있다. 결정된 설계변수 값은 Table 1에 나타나 있으며, 이에 따라 제작된 ER 및 MR 클러치는 Fig. 6에 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이 간극(h), 간극 수(N), 디스크의 외측 반지름(R_o)이 두 클러치의 경우 동일하다. 예를 들어 R_o 를 0.025m로 설정할 경우, ER 클러치는 2kV의 고전압으로 0.023Nm, MR 클러치는 1.2A의 전류로 5.21Nm의 토크전달을 예측할 수 있다. ER 클러치는 디스크가 전극의 역할을 하며, 재질은 두랄루민(duralumin)이다. MR 클러치의 자로는 연강으로 제작하였으며, 직경

Table 1 Design parameters of ER and MR clutches.

Design Parameters	ER Clutch	MR Clutch
Max. Yield Shear Stress τ_y	0.31kPa	79.6kPa
Max. Field F	2.0kV/mm	240A/mm
Viscosity η	0.08Pas	0.2Pas
Gap Size h	0.001m	
No. of Gap N	2ea	
Outer Radius R_o	0.025m	
Max. Relative Angular Velocity f	5Hz	
Total Torque T_T	0.023Nm	5.21Nm
Electrical Input	2.0kV	1.2A

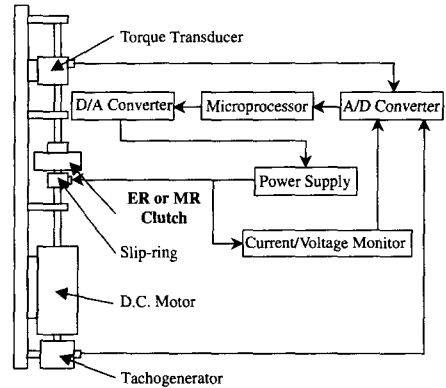


Fig. 7 Schematic configuration of experimental apparatus.

0.001m의 코일을 외측디스크에 400회 감았다. 시일(seal)을 설치하면, ER 및 MR 유체의 누출은 방지할 수 있지만, 이에 수반하는 마찰토크가 토크 출력에 포함된다. 본 연구의 관심은 제어토크와 점성토크에 비중을 두고 있으므로, 시일을 설치하지 않고 클러치를 수직의 상태에서 실험을 수행할 수 있도록 설계하였다. 각각의 클러치에 전압과 전류를 부하하기 위하여 슬립-링(slip-ring)을 설치하였으며, 구동원은 관성모멘트가 큰 외측디스크의 입력축에 연결하였다.

4. 클러치의 성능 고찰

4.1 실험장치의 구성

Fig. 7과 같은 실험장치를 구성하여 ER 및 MR 클러치의 성능을 고찰하였다. ER 및 MR 클러치의

구동원은 6.7Nm의 부하토크를 16.7Hz로 회전시킬 수 있는 용량을 가지고, 속도조절이 가능한 직류모터이며, ER 및 MR 클러치의 입력축에 연결되어 있다. 전달 토크를 측정하기 위하여 ER 및 MR 클러치의 출력축에 0.196Nm, 22.58Nm의 용량을 가지는 토크 트랜스듀서 들을 각각 설치하였다. 입력축과 출력축의 회전속도의 차이는 직류모터의 회전속도와 같으며, 타코제너레이터(tachogenerator)를 이용하여 10Hz 까지 측정되었다. 마이크로프로세서에서 출력된 디지털신호는 D/A 컨버터를 통하여 1000V/V의 이득을 가지는 고전압증폭기에 입력되어 증폭된 후 ER 클러치의 전극에 부하 되어 간극 사이에 전기장을 형성하였다. 그리고, 입력전압에 대하여 선형적으로 0.12A의 전류를 출력할 수 있는 전력공급장치를 이용하여 MR 클러치의 솔레노이드에 부하 되어 자기장을 형성하게 하였다. 전력공급장치로의 입력전압, ER 및 MR 클러치로의 부하전압, 부하전류 그리고 토크 트랜스듀서에서의 출력전압은 A/D 컨버터를 통하여 마이크로프로세서에 저장된다.

4.2 전달토크특성

ER 클러치에 고전압 0.5kV, 1.0kV, 1.5kV, 2.0kV

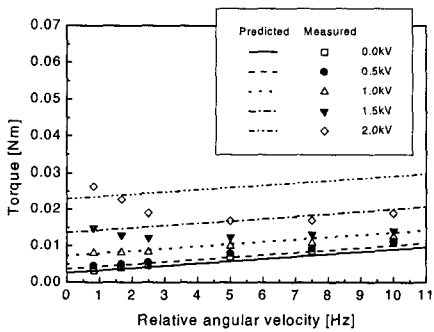


Fig. 8 Field-dependent torque of the ER clutch.

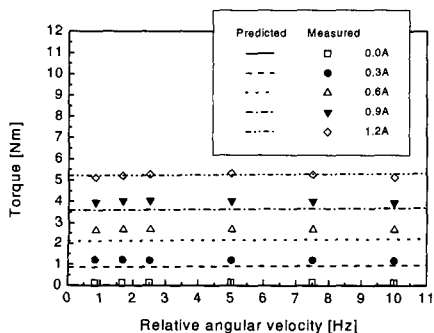


Fig. 9 Field-dependent torque of the MR clutch.

를 부하하면서, 회전속도의 차가 0.83Hz, 1.67Hz, 2.5Hz, 5.0Hz, 7.5Hz, 10.0Hz 일 때의 전달 토크를 정상상태에서 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 입력축과 출력축의 회전속도의 차가 커지면 점성토크의 증가와 더불어 전체토크도 증가하는 경향을 보이고 있다. 높은 회전속도 하에서는 실험치가 예상치 보다 작은 결과를 나타내었다. 이는 부하하는 고전압의 세기가 증가하면 ER 유체 내에서 입자들간의 결합력이 증가하지만, ER 유체에 유동이 발생되면 입자들 간의 이동이나 회전이 발생하고 이러한 입자들의 사이로 흐르는 전류밀도의 세기가 작아지므로 입자들 간의 결합력이 약해져 체인 구조가 쉽게 부서지므로 때문이다. MR 클러치에 전류를 0.3A, 0.6A, 0.9A, 1.2A를 부하하면서, 회전속도의 차이가 ER 클러치의 값과 같게 하고 토크를 정상상태에서 측정한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. MR 효과로 인한 제어토크가 점성토크보다 상당히 크므로 회전속도의 증가에 따른 토크의 증가가 미소하며, 제어토크가 전체토크에 지배적인 영향을 주고 있다.

5Hz의 회전속도 하에서 점성토크와 제어토크만을 고려하여 볼 때, ER 클러치는 2.0kV의 고전압 부하 시 약 0.013Nm의 토크를 전달하였고, MR 클러치는 1.2A의 전류를 부하 시 5.26Nm의 토크를 전달하였다. 제어토크와 점성토크의 합을 고려한 전체토크의 크기는 본 연구에서 설계한 MR 클러치는 ER 클러치의 약 400 배의 토크 전달이 가능함을 알 수 있다. 그리고 제어토크만을 고려할 때 MR 클러치가 ER 클러치의 약 520 배의 토크 전달이 가능함을 알 수 있다.

4.3 응답특성

계단입력전압에 대한 토크 출력을 고찰하는 과도응답실험을 수행함으로써 ER 및 MR 클러치의 응답속도를 확인 할 수 있다. ER 및 MR 클러치의 구동원의 회전속도는 전기장이나 자기장의 무 부하 시 5Hz로 설정하였다. ER 클러치의 대한 과도응답실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 고전압 부하하는 고전압의 세기가 증가할수록 응답이 빨라지는 경향을 보였으며, 고전압 제거 시는 특별한 경향을 찾을 수 없었다. 계단입력전압에 대한 토크출력을 1차 시스템으로 가정하여 구한 시상수를 Fig. 11에 나타내었다. 고전압 부하 시 (rising) 7.8ms, 고전압 제거 시(falling) 6.6ms로서, 고전압 제거 시가 부하 시보다 약간 빠른 응답특성을 보였으며, 모든 시상수의 산술평균치는 약 8ms이다.

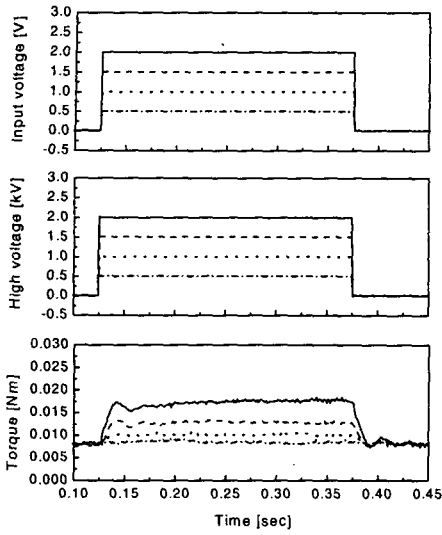


Fig. 10 Transient responses of the ER clutch.

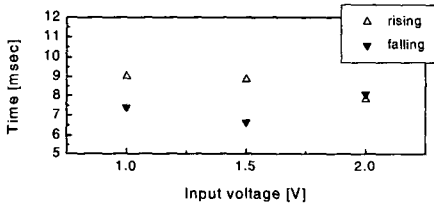


Fig. 11 Response time of the ER clutch to step input voltages.

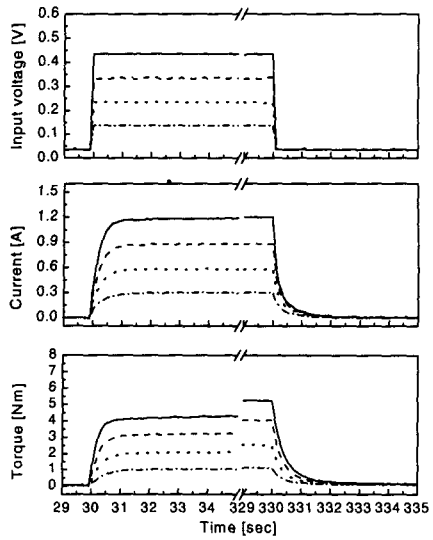


Fig. 12 Transient responses of the MR clutch.

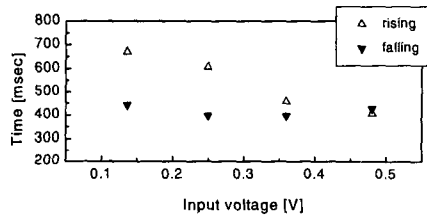


Fig. 13 Response time of the MR clutch to step input voltages

MR 클러치의 과도응답실험 결과는 Fig. 12 에 나타내었다. 전력공급장치의 응답특성과 MR 클러치의 자기회로의 슬레노이드로 인한 인덕턴스로 인하여, 입력전압의 계단입력에 대하여 전류는 시간지연을 가지게 되며 1 차 시스템의 거동을 보였다. 계단입력전압에 대한 토크의 응답은 ER 클러치와 같이 전류의 부하 시 전류의 세기가 증가할수록 응답이 빨라지는 경향을 보였으며, 전류의 제거 시는 그 응답속도의 큰 변화를 찾아 볼 수가 없었다. 계단입력전압에 대한 토크출력의 시상수를 Fig. 13 에 나타내었다. 전류의 부하 시 409● 669msec, 전류의 제거 시 397● 442msec 로서, 전류의 제거 시의 응답이 더 빨랐으며, 모든 시상수의 산술평균치는 약 475msec 이다.

MR 클러치에 비하여 ER 클러치는 입력전압의 부하 시 약 63배, 입력전압의 제거 시 약 57배의 빠른 응답특성을 가지고 있으며, 두 클러치 모두 입력전압 제거 시의 응답이 부하 시 보다 더 빠른 응답특성을 보였다..

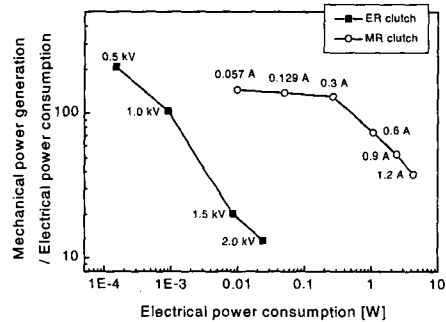


Fig. 14 Mechanical power generation to electric power consumption.

4.4 전력소모

5Hz 의 회전속도에서 측정된 제어토크와 클러치로의 입력전압, 입력전류를 측정하여 전기에너지의 입력에 대한 기계에너지의 출력에 대한 비를 구하여 Fig. 14 에 나타내었다. ER 클러치를 구동시키기에 적은 양의 전력이 필요함을 알 수 있다. 두 클러치 모두 토크가 작은 영역에서 에너지 전환비가 높은 것을 알 수 있으며, 전력의 소모량이

동일한 영역에서는 MR 클러치의 에너지 전환비가 ER 클러치의 그것보다 비교적 높은 것을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 두 클러치 간의 성능특성은 만일 설계구속조건을 다르게 한다면 변화할 것이다. 본 연구에서 설계구속조건으로 선택한 동일한 간극, 간극 수, 디스크 외측 반지름 등이 아닌 동일한 제어전달토크 등을 클러치 설계구속조건으로 채택한다면 본 연구에서 정량적으로 비교된 응답속도와 전력소모 등이 다르게 나타날 것이다. 향후 보다 유용한 설계 데이터를 확보하기 위하여 다양한 구속조건에 따른 성능 고찰 및 비교 연구가 수행되어야 할 것이다.

5. 토크 제어 성능

5.1 제어기 설계

본 연구에서는 ER 및 MR 클러치의 토크제어 성능을 확인하고자 슬라이딩모드제어기를 설계하였다. ER 및 MR 클러치 작동기는 전력공급장치와 ER 및 MR 효과의 1차 시스템 등이 직렬 연결되어 있는 2차의 과감쇠 시스템으로 모델링할 수 있으며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$t_p t_c \ddot{T}_c(t) + (t_p + t_c) \dot{T}_c(t) + T_c(t) = \tilde{u}(t) + d(t) \quad (7)$$

$$\tilde{u}(t) = c_1(p_1 + p_2 u(t))^{c_2} \quad (8)$$

여기서, $T_c(t)$ 는 제어토크, $d(t)$ 는 토크제어 시스템에 입력되는 외란, t_p 는 전력공급장치의 시상수, t_c 는 고전압 및 전류의 입력에 대한 ER 및 MR 유체 반응속도를 의미하는 클러치 자체의 시상수이다. t_p 와 t_c 는 과도응답실험 결과에 곡선맞춤법을 수행하여 도출할 수 있다. ER 클러치의 경우 Fig. 10에 나타난 응답 결과를 이용하여, 계단입력 전압에 대한 고전압출력으로부터 t_p 를 구하고, 고전압입력에 대한 토크출력으로 t_c 를 도출할 수 있다. MR 클러치의 경우는 Fig. 12에 근거하여, ER 클러치에 적용한 방법으로 시상수 들을 구할 수 있다. ER 클러치와 MR 클러치의 제어토크는 고전압과 전류의 세기에 대한 지수함수로 표현할 수 있기 때문에 식 (8)과 같이 입력전압 $u(t)$ 에 대한 출력토크 $\tilde{u}(t)$ 의 관계를 표현할 수 있다. 이러한 관계 들로부터 p_1 , p_2 와 c_1 , c_2 를 도출할 수 있다.

제어기 설계를 위하여 식 (7)을 상태공간방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = [x_1 \ x_2]^T = [T_c \ \dot{T}_c]^T \quad (9)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = A x(t) + B \tilde{u}(t) + D d(t) \quad (10)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{t_p t_c} & -\frac{t_p + t_c}{t_p t_c} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

일반적으로 전력공급장치의 시상수 t_p 와 클러치의 시상수 t_c 는 실험적으로 파악될 수 있지만 Fig. 11과 Fig. 13에서 살펴본 바와 같이 입력크기에 따라 변할 수 있다. 따라서 이들 값의 변동을 고려하여 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$t_p = t_{pn} + \Delta t_p, \quad |\Delta t_p| \leq t_{pl} \quad (12)$$

$$t_c = t_{cn} + \Delta t_c, \quad |\Delta t_c| \leq t_{cl}$$

여기서, t_{pn} 과 t_{cn} 은 공칭값(nominal value)을 나타내며, Δt_p 와 Δt_c 는 변동값(perturbation value)을 나타낸다. 그리고 t_{pl} 과 t_{cl} 은 변동값의 한계값을 의미한다. 이들 변수 변동을 고려하면, 식 (10)의 시스템 및 입력 행렬 등도 공칭부와 불확실성부로 표현될 수 있다.

이러한 시스템의 토크추적제어를 위하여 제일 먼저 추적오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e(t) = [e_1 \ e_2]^T = [x_1 - x_{d1} \ x_2 - x_{d2}]^T \quad (13)$$

여기서, $x_d(t)$ 는 추적해야 할 요구토크변수를 나타낸다. 임의의 초기 조건에 대하여 추적오차를 영(zero)으로 보내기 위하여 다음과 같은 안정 슬라이딩서피스를 설정한다.

$$s(e(t)) = c e_1(t) + e_2(t) = 0, c > 0 \quad (14)$$

따라서, 슬라이딩모드가 존재하기 위한 $s(e(t))\dot{s}(e(t)) < 0$ 조건에 근거하여 제어기를 설계하면 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} \ddot{u}(t) = & t_{pn}t_{cn}\dot{x}_{d2}(t) + x_1(t) + (t_{cn} + t_{pn})x_2(t) \\ & + ct_{cn}t_{pn}\dot{x}_{d1}(t) - ct_{pn}t_{cn}x_2(t) \\ & - \left(k + (t_{pl} + t_{cl})x_2(t) + (t_{pn}t_{cl} + t_{pl}t_{cn} + t_{pl}t_{cl})\dot{x}_{d2}(t) \right. \\ & \left. - (ct_{pn}t_{cl} + ct_{pl}t_{cn} + ct_{pl}t_{cl})e_2(t) \right) \text{sgn}(s(t)), k > |d(t)| \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 k 는 불연속 제어 이득을 나타낸다. 결국 식 (8)과 식 (15)로부터 클러치에 공급되는 제어입력이 결정된다. 한편, 불연속제어기는 채터링(chattering)을 유발하므로, 실제 시스템에 적용하기에는 부적절하다. 따라서, 추적오차가 경계층의 내부에 존재 시에는 부호함수 $\text{sgn}(s(t))$ 를 경계층 두께(ϵ)를 갖는 포화함수로 대체하여 불연속 제어기를 연속제어기로 근사화 시켜 사용한다.

5.2 제어결과 및 고찰

실험에 적용한 각종 제어변수는 Table 2에 나타내었다. 이들 변수 중 c, k, ϵ 은 최대입력전압등을 고려하여 알맞게 설정되었다. 토크추적제어

Table 2 Torque control system parameters.

Control Parameters	ER Clutch	MR Clutch
t_{pn} [sec]	0.0006	0.303
t_{cn} [sec]	0.0068	0.153
t_{pl} [sec]	0.0002	0.15
t_{cl} [sec]	0.002	0.08
p_1	0.0	-0.059
p_2	1.0	2.64
c_1	0.002	4.38
c_2	2.15	1.08
c	20.00	500
k	0.003	0.5
ϵ	1.0	3.1

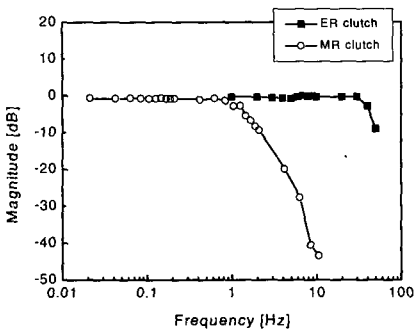
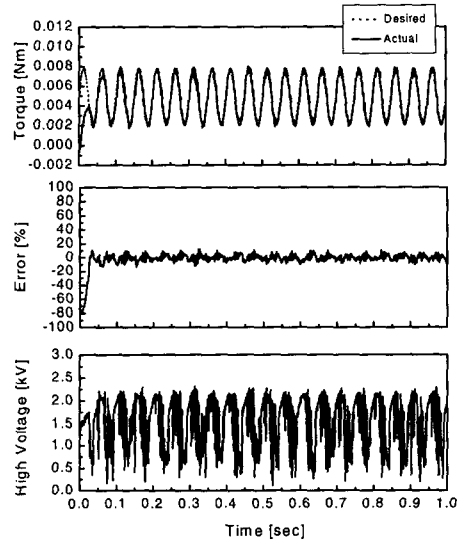


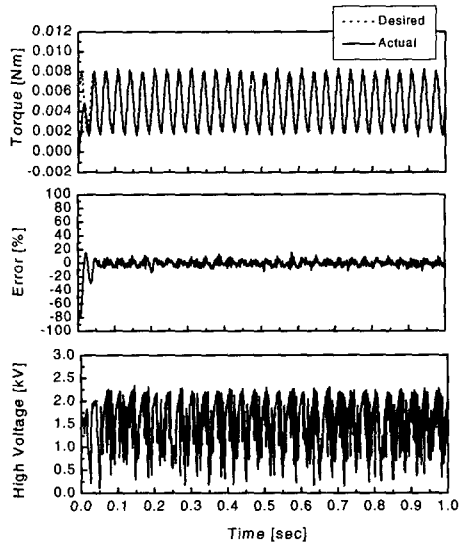
Fig. 15 Bode magnitude plot of ER and MR clutches.

에 앞서 각 클러치의 제어가능영역(control bandwidth)을 실험으로 고찰하기 위하여 주파수 영역에서의 토크응답을 얻었다. Fig. 15는 실험적으로 도출한 각 클러치의 보드선도를 나타낸다. 이로부터 ER 클러치의 제어가능한 대역주파수는 약 40Hz이며, MR 클러치의 경우는 약 1.3Hz임을 알 수 있다. 이러한 차이는 ER 및 MR 클러치 작동기의 응답속도로부터 파악할 수 있다.

Fig. 16은 제안된 슬라이딩모드제어기의 실험으로 얻은 ER 클러치의 토크 추적성능을 나타낸



(a) 20Hz



(b) 30Hz

Fig. 16 Sinusoidal trajectory tracking control with the ER clutch.

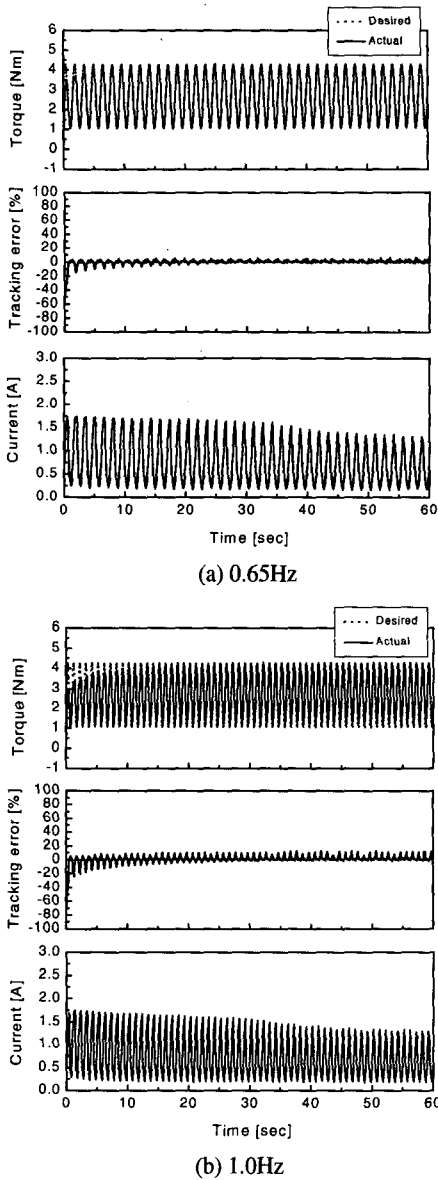


Fig. 17 Sinusoidal trajectory tracking control with the MR clutch.

다. 요구토크케치는 정현파로서 $0.0029 \sin(2\pi f_1 t) + 0.0049 \text{Nm}$ 로 표현된다. 여기서 f_1 은 추적하고자 하는 케치의 주파수로서 Fig. 15에 나타난 ER 클러치의 대역주파수의 0.5와 0.75 배에 해당되는 20Hz와 30Hz로 설정하였다. 결과에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 양호한 추적제어가 수행되었으며, 요구토크의 최대값 0.0078Nm에 대한 백분율로 추적오차를 환산할 경우 추적오차는 전체적으로 약 $\pm 10\%$ 이내이다. 한편, 요구케치가 $1.6 \sin(2\pi f_1 t) + 2.66 \text{Nm}$ 로 설정된 MR 클러치의 토

크추적제어 성능이 Fig. 17에 나타나 있다. 이 경우 역시 MR 클러치의 제어대역폭의 0.5와 0.75 배에 해당되는 0.65Hz와 1.0Hz를 추적주파수 f_1 으로 설정하였다. 비록 정상상태에 도달하는 시간이 비교적 느리지만 제어를 시작하여 약 15초가 지나면서부터는 추적제어가 우수하게 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 요구케치의 최대값 4.26Nm에 대한 백분율을 추적오차로 나타내면, 15초 이후부터는 약 $\pm 5\%$ 정도 이내이다.

6. 결론

본 연구에서는 ER 및 MR 유체를 이용하여 동일한 간극 및 간극 수를 갖는 ER 및 MR 클러치를 설계하고 그 성능을 실험적으로 비교 고찰하였다. 설계식의 무차원화를 수행하여 각 클러치의 성능을 비교할 수 있는 기준을 설정한 후 두 클러치를 제작하였다. 성능실험 결과, 클러치가 전달할 수 있는 토크의 크기는 ER 및 MR 유체의 항복전단응력에 크게 의존하며, ER 클러치에 비하여 MR 클러치가 매우 큰 토크를 전달할 수 있었다. ER 클러치의 토크 응답시간은 유체의 특성에 주로 의존하며, MR 클러치는 유체의 특성과 슬레노이드의 인덕턴스에 의하여 큰 영향을 받았다. 응답속도는 ER 클러치가 MR 클러치보다 현저히 빠름을 확인하였다. ER 클러치의 전력소모량이 MR 클러치에 비하여 매우 작았으나, 전력 소모량이 동일한 영역에서는 MR 클러치의 에너지 전환비가 ER 클러치의 경우보다 높았다. 토크추적제어를 위하여 시스템의 시간지연이 고려된 슬라이딩모드제어를 설계하여, 토크제어성능을 실험적으로 고찰하였다. 예상한 바와 같이 ER 클러치는 MR 클러치에 비하여 작은 크기의 토크를 높은 주파수의 영역까지 제어할 수 있었으며, 추적오차의 한계는 유사하였다.

향후 제안된 클러치의 실용화를 위하여 보다 광범위한 설계자료가 확보되어야 하며 추적오차의 정밀도 향상을 위한 여러 제어조직의 개발과 함께 내구성 연구도 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Ginder, J. M. and Ceccio, S. L., 1995, "The Effect of Electrical Transients on the Shear Stresses in Electrorheological Fluids," *Journal of Rheology*, Vol. 39, No. 1, pp. 211-234.
- (2) Choi, S. B., Park, Y. K., and Cheong, C. C., 1996, "Active Vibration Control of Intelligent

- Composite Laminate Structures Incorporating an Electro-rheological Fluid," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, pp. 411~419.
- (3) Choi, S. B., Choi, Y. T., Chang, E. G., Han, S. J. and Kim, C. S., 1998, "Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper," *Mechatronics*, Vol. 8, No. 2, pp. 143~161.
- (4) Tanaka, T. and Gofuku, A., 1997, "Development and Analysis of an ERF Pressure Control Valve," *Mechatronics*, Vol. 7, No. 4, pp. 317~335.
- (5) Carlson, J. D., Cantanzarite, D. M. and St. Clair, K. A., 1995, "Commercial Magneto-rheological Fluid Devices," *Proceedings of the 5th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology*, pp. 20~28.
- (6) Bölter, R. and Janocha, H., 1997, "Design Rules for MR Fluid Actuators in Different Working Modes," *Proceedings of the SPIE's 1997 Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 3045, pp. 148~159.
- (7) Block, H. and Kelly, J. P., 1988, "REVIEW ARTICLE Electro-rheology," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 21, pp. 1661~1677.
- (8) Choi, S. B., Park, D. W. and Jayasuriya, S., 1994, "A Time-Varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second-Order Uncertain Systems," *Automatica*, Vol. 30, No. 5, pp. 899~904.