

9. 1 (1450-)

전기유변성 클러치의 동력전달 메커니즘 제3보 : ER 클러치 성능에 관한 실험적 고찰

이규한¹⁾ · 심현해* · 김창호* · 임윤철**

연세대학교 기계공학과 대학원
*한국과학기술연구원 트라이볼로지연구소
**연세대학교 기계공학과

Power Transmission Mechanism of Electrorheological Clutch Part III: Experimental considerations on performance of ER clutch

Kyoo-Han Lee, Hyun-Hae Shim*, Chang-Ho Kim* and Yoon-Chul Rhim**

Department of Mechanical Engineering Graduate School, Yonsei University
**Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology*
***Department of Mechanical Engineering, Yonsei University*

Abstract—ER clutch is a device using ER fluid, so called "intelligent material" and is a power transmission system controlled with electric field strength. In this paper(Part III), the behavior of ER clutch under proper conditions was investigated experimentally and compared to theoretical analyses developed from Part I, II. Considering the optimum design concept proposed from Part I, the concentric cylinder type of ER clutch was designed and the experimental apparatus for the performance test was constructed. The comparisons made indicated that the power transmission model of ER clutch and the temperature rise model of ER fluid developed from Part I, II were acceptable for engineering design calculations.

Key words—ER fluid, ER clutch, power transmission model, temperature rise model, comparisons between theoretical analyses and experimental results.

1. 서 론

전기유변성(이하 'ER' 이라 칭함) 클러치의 동력전달 메커니즘에 관한 이론 해석적인 선행 연구(제 1 보와 제 2 보)에서, ER 클러치의 동력전달 성능은 작동 파라미터와 기하학적 설계변수 및 ER 유체의 온도에 의해 크게 영향을 받으며, 이 영향을 종합적으로 고려하면 최적설계 및 성능예측이 이루어 질 수 있음을 논술했다[1,2]. 본 논문(제 3 보)은 이러한 선행 연구들의 주요 결과를 실험적 관점에서 고찰한 것이다. 이론적 해석의 대상이었던 동심원통형 ER 클러치(concen-

tric cylinder type ER clutch)를 설계 제작하였고, 성능 실험을 위한 장치와 계측 제어 시스템을 구성하여 ER 클러치의 동력전달 해석모델과 작동 파라미터 및 기하학적 설계변수의 영향에 관한 해석결과 및 ER 유체의 온도상승 예측모델의 타당성을 실험적으로 검증하였다.

2. ER 유체의 선정 및 ER 클러치의 설계

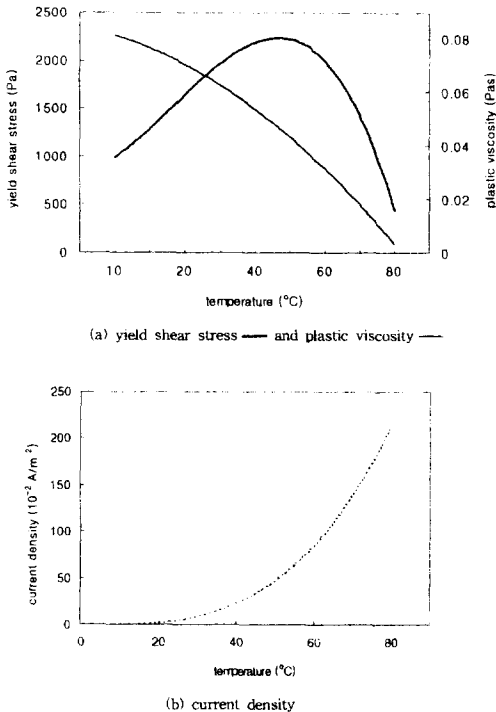
2-1. ER 유체의 선정

ER 클러치의 작동조건 및 기계적·열적 성능을 고려할 때, 요구되는 ER 유체의 특성은 낮은 소성점도(low plastic viscosity), 전기장 인가시 큰 항복응력(high

¹⁾현재 대우전자(주) 압축기개발팀

Table 1. Properties of selected ER fluid

Temperature (°C)	0	10	20	40	60
Zero field viscosity (mPas)	98	80	73	55	27
Threshold field strength E_0 (V/mm)	1651	1597	1382	999	804
Electrorheological effect S (Pa·mm/kV)	436	706	981	1106	889
Shear stress at 3 kV/mm (Pa)	588	991	1587	2213	1952
Current density at 3 kV/mm ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	---	0.6	3.3	21.3	85.8

**Fig. 1. Temperature dependency of ER fluid property.**

yield stress), 온도상승에 대한 안정성(thermal stability), 미시입자의 침전에 대한 안정성(sedimentation stability), 침전된 입자의 재분산성(redispersibility), 다른 재료와의 적합성(material compatibility), 미시입자의 무마멸성(no abrasiveness) 등이다[3-6].

본 연구에서는 ER 클러치에 적용할 ER 유체를 실리 콘 오일에 미시 고분자 입자를 분산시킨 독일 BAY-ER 사의 TP AI 3565로 선정 하였고 이 ER 유체의 중요 특성을 Table 1과 Fig. 1에 표시 하였다[7].

2-2. ER 클러치의 설계조건

ER 클러치의 설계시 고려해야 할 중요 조건들을 요약하면 아래와 같다[8-11].

- (1) ER 클러치에 요구되는 토크출력 범위와 ER 유체의 초기점도 및 발생가능한 항복응력과 부합성.
- (2) 전극재료와 ER 유체와의 재료적인 적합성.
- (3) 전극면의 통전성을 극대화시키기 위한 표면처리.
- (4) ER 유체의 미시전도성 입자 침전 후, 이를 기계적으로 재분산시킬 수 있는 구동형식 및 형상 설계.
- (5) 출력로터의 회전질량관성을 극소화시키는 설계.
- (6) 고전압 인가에 대한 절연(insulation)설계.
- (7) ER 유체의 누출(leakage)방지를 위한 밀봉(sealing)설계.
- (8) 전극사이의 간격(일반적으로 0.5 mm~1.5 mm) 유지를 위한 설계 및 진동문제
- (9) ER 유체의 교환 및 조작의 편리성을 위한 설계

2-3. 본 연구에서 설계한 ER 클러치

본 연구에서 설계한 동심 원통형 ER 클러치는 Fig. 2, Fig. 3과 같으며, 특히 Fig. 3은 출력로터의 관성을 극소화 시키고, 작용면적을 증대시켜서 ER 클러치의 가·감속성능을 향상시킬 목적으로 설계된 ER 클러치이다. 전술한 설계조건과의 연관성을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 선정한 ER 유체는, 20°C에서 초기 점도는 73 mPas이고, 최대항복 전단응력은 3000 V/mm의 전기장에서 1587 Pa로서, 이는 제 1보에서 기술한 ER 클러치 해석수치에 부합하는 값이다.
- (2) 전극재료는 두랄루민(Al 7075)를 사용하였고, 선정된 ER 유체는 이 재료와의 적합성이 뛰어나다.
- (3) 전극면의 통전성을 좋게 하고 화학적인 부반응을 억제하기 위해 '알로딘' 이라는 표면처리를 수행하였다.
- (4) ER 유체는 근본적으로 밀도가 다른 두 상(two phases)으로 존재하기 때문에 기계적인 교반작용이 없으면 미시입자가 중력에 의해 침전하게 된다. 따라서 기계적 설계의 관점에서 이를 재분산시키는 방법이

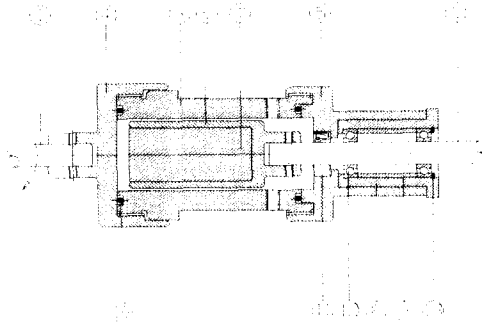


Fig. 2. Designed ER clutch Model 1.

1. drive shaft 2. output shaft 3. outer cylinder 4. left flange 5. insulated right flange 6. inner cylinder 7. plastic rod 8. bearing housing 9. stopper 10. o-ring 11. lip seal 12. radial ball bearing 13. snap ring.

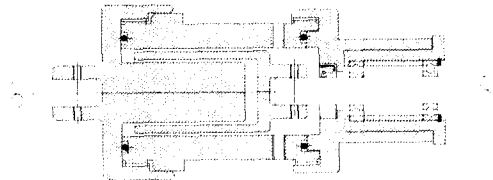


Fig. 3. Designed ER clutch Model 2.

1-A. motor A, 1-B. motor B, 2-A. ER clutch A, 2-B. ER clutch B, 3. flywheel, 4-A. rotary torque sensor and encoder A, 4-B. rotary torque sensor and encoder B, 5-A. insulated flexible coupling (Motor), 5-B. insulated flexible coupling (torque sensor), 6. slip ring, 7. base.

요구되며, 본 연구에서는 ER 클러치의 입력을 외원통으로 설계해 침전된 입자들을 띄워 주도록 하였다.

(5) 출력로터의 회전관성을 극소화시키기 위해 내원통 설계시 비중이 작은 플라스틱 재료를 삽입하였다.

(6) 입·출력부 사이의 절연을 위해 플라스틱 재료를 이용한 절연 플랜지를 제작 부착하였다.

(7) ER 유체의 누출 방지를 위한 밀봉을 위해 O-링과 립실(Lip seal)을 적용하였다.

(8) ER 클러치가 고속으로 회전시 구동축의 진동에 의해 발생할 수 있는 전극면의 접촉을 효과적으로 방지하기 위해 radial ball bearing을 일정한 거리를 두고 삽입하였다.

(9) ER 유체의 교환을 위해 외원통 상·하부에 주입구 및 출구를 가공하였고, 조립·분해의 편의를 위해 기계공구 적용을 위한 평면을 가공하였다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. ER 클러치 실험장치

Fig. 4는 ER 클러치 실험장치의 구성도이다.

회전방향은 반대이고 각속도는 일정한 구동모터 A·B의 동력이 절연 연성 커플링(insulated flexible couplings) A·B를 경유하여 ER 클러치 A·B의 입력로터(본 연구에서는 외원통을 입력로터로 채용)를 회전시켜 주며, 고전압이 슬립링(slip rings)을 통해 순차적인 ON/OFF 메커니즘으로 구동축(driving shafts)에 인가되어, ER 클러치의 전극면 사이에서 전기장을 형성시킨다. ER 유체의 고체화(solidification)에 의해 플라이휠이 부착된 출력축이 구동하며, 회전축계의 회전중심은 ER 클러치의 입·출력축과 토크센서 입·출력축에 장착된 베어링 레이스를 통해 정확히 유지된다.

3-2. 계측·제어 계의 구성

ER 클러치의 성능 실험을 위해 구성한 계측·제어 시스템은 Fig. 5와 같고 계측 제어 파라미터에 따른 구성요소의 용도 및 제원은 다음과 같다.

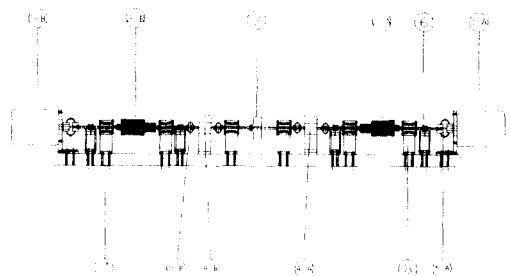


Fig. 4. ER clutch test rig.

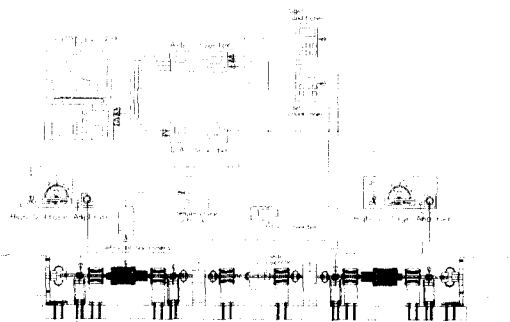


Fig. 5. Measurement and control system for performance test of ER clutch.

Table 2. Specifications of rotary torque sensor and signal conditioner

Rotary torque sensor	-Capacity	Up to 200 in.lb: 2.0 mV/V nominal
	-Output at full scale	
	-Non-linearity	0.10% of full scale
	-Hysteresis	0.10% of full scale
	-Zero balance	1.00% of full scale
	-Temp. effect on Zero	0.002% of full scale/oF
	-Bridge resistance	1000 Ω
	-Excitation voltage,	20 Vdc
	-Maximum shaft speed	3000 rpm
Signal conditioner	-Accuracy	± 0.01% of range ± 1 count
	-Excitation	10 V or 24 V dc
	-Analog output	0-10 V
	-Linearity	± 0.05%

3-2-1. 고전압 증폭기(High Voltage Amplifier)

Fig. 5에서 고전압 증폭기는 0~10 V의 제어 입력전압을 0~5000 V의 고전압으로 증폭시켜 ER 클러치 전극에 전기장을 형성 시키기 위해 사용 되었으며, 전압 증폭을 위한 증폭회로(amplification circuit)와 증폭기의 시상수를 측정하기 위한 1:1 비교회로(comparison circuit)로 구성되어 있다. 또한 ER 유체의 전류밀도 증가에 의한 전기난락시, 기기의 안전성을 보장하기 위해 1 mA의 limit current에서 접지로 고전압을 방전시키는 by-pass circuit을 채택하였다.

3-2-2. ER 클러치의 전달토크 측정

ER 클러치의 전달토크 측정을 위해 rotary torque sensor를 사용하였으며, rotary torque sensor로부터 측정된 신호들의 처리(ie., filtering and amplification)를 위해 signal conditioner를 사용하였다. 그 제원은 Table 2와 같다.

3-2-3. Flywheel의 각속도 측정

ER 클러치의 동력전달에 의해, 변화하는 flywheel의 각속도를 측정하기 위하여, magneto-resistive type gap sensor와 notched disk를 이용하였으며, gap sensor로부터 전송되는 구형파 신호를 각속도로 변환하기 위해 FV(Frequency to Voltage) converter를 사용하였

Table 3. Specifications of angular velocity measurement system

Gap sensor	-Excitation voltage: -18 V
Notched disk	-Resolution: 12 pulses/rev
	-Frequency range: 0~2000 Hz
FV converter	-RPM range: 0~10000 rpm
	-Output voltage: 0~10 V

다. 각속도 계측시스템의 제원은 Table 3과 같다.

3-2-4. ER 클러치의 외원통 표면온도 측정

ER 클러치 외원통의 표면온도를 측정하기 위해 적외선 카메라(afrrared lay camera) 및 온도조절기(temperature controller)가 적용되었으며, 그 중요제원은 Table 4와 같다.

3-2-5. A/D-D/A Converter

디지털 컴퓨터에 의한 계측·제어 구현을 위해 A/D and D/A board를 사용하였다. 이 제원은 Table 5로 요약된다.

3-3. 실험조건 및 방법

3-3-1. 고전압 증폭기의 실험적 모델링

ER 클러치의 응답에는 고전압 증폭기의 동적거동이 포함되어 있으므로 이 장치의 거동을 수학적으로 모델링하는 것이 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 고전압증폭기의 이득(gain)을 $500 \frac{V}{V}$ 로 설정한 후, 다음과 같은 방법으로 증폭기의 응답을 측정하였다.

(1) 0~10 V의 크기와 1 Hz의 주파수를 갖는 구형파

Table 4. Specifications of afrrared lay camera system

Afrrared lay camera	-Temperature range: 0~1000°C
Temperature controller	-Analog output: 0~1 V

Table 5. Specifications of A/D-D/A board

A/D-D/A board	-Sampling frequency: 100 kHz
	-Resolution: 12 bit A/D-D/A
	-Analog Input Channels: 16 single ended or 8 differential
	-Analog Output Channels: 2

Table 6. Power transmission test conditions

	Model 1	Model 2
Geometrical parameters	active diameter=30 mm electrode gap=1 mm active length=55 mm	active diameter=25 mm, 30 mm electrode gap=1 mm, 1 mm electrode length=55 mm, 55 mm
Kinetic parameters	angular velocity of input rotor=100~1500 rpm resistive torque=0.05 Nm mass moment of inertia of output rotor part (flywheel : Plastic, Aluminium, Steel material) =5.86 × 10 ⁻⁴ ~24.39 × 10 ⁻⁴ kg m ² (Model 1) =5.60 × 10 ⁻⁴ ~24.12 × 10 ⁻⁴ kg m ² (Model 2)	
ER fluid properties	plastic viscosity=75 mPas at 20°C yield shear stress: $\tau_y = AE^n$ Pa (A=0.000521 n=1.8614)	

(square wave) 입력신호가 함수발생기(function generator)에서 생성되고, 고전압증폭기와 A/D board가 장착된 컴퓨터에 입력된다.

(2) 고전압증폭기는 구형파 입력신호를 500 V/V의 이득을 가지고 고전압으로 증폭시키며, 내장된 1:1 비교회로가 0~5000 V의 증폭신호 출력과정과 동시적으로 0~10 V의 비교신호를 생성시킨다. 이 신호는 A/D board를 통해 컴퓨터에 입력된다.

(3) (1)과(2)같은 과정으로 측정된 신호들 즉, 구형파 입력신호와 비교회로의 출력신호, 사이의 시간지연(time delay)을 계산함으로써 증폭기의 시상수(time constant)를 측정할 수 있다.

3-3-2. ER 클러치의 동력전달 성능실험

Table 6과 같은 실험조건에서, ER 클러치 Model 1 및 Model 2의 동력전달 성능을 조사하였다.

동력전달 성능실험의 방법은 아래와 같다.

(1) ER 클러치B의 전달토크를 제어하여 ER 클러치A의 전달토크와 같게한다.

(2) 5 V의 크기를 갖는 계단 제어입력전압(step control input voltage)이 컴퓨터에서 생성되어 D/A board를 통해 고전압 증폭기A에 입력된다.

(3) 5 V의 제어입력전압은 고전압 증폭기A에서 2500 V의 고전압으로 증폭되어 ER 클러치A에 인가된다(전기장 생성).

(4) 전기장생성에 의한 ER 유체의 고체화에 의해 ER 클러치A의 출력로터에 ER 토크가 전달되며, 가속이 시작된다.

(5) rotary torque sensor와 gap sensor로부터의 측정신호는 signal conditioner와 FV converter에서 증폭 및 필터링되어 A/D board를 통해 컴퓨터로 입력된다.

(6) 계단 제어입력전압 출력시점과 출력로터의 각속도가 입력로터의 각속도까지 가속된 시점을 산출하여, ER 클러치의 가속 시상수를 측정한다.

3-3-3. ER 유체의 온도상승 및 ER 클러치의 성능 변화 실험

ER 유체의 온도상승에 의한 ER 클러치의 동력전달 성능변화를 조사하기 위해 설정한 실험조건은 Table 7과 같다.

동력전달 성능에 대한 ER 유체의 온도상승 효과 실험방법은 아래와 같다.

(1) ER 클러치의 출력로터를 고정(fixed)시키고, 구동모터A의 각속도를 설정한다.

(2) 빙햄소성체 거동모드(Mode 2)에서는 전기장을 인가하고 뉴토니안 유체 거동모드(Mode 1)에서는 인가하지 않는다.

Table 7. Performance test conditions according to temperature rise of ER fluid

Geometrical parameters (Model 1)	active area of output rotor -active diameter=30 mm -electrode gap=1 mm -active length=55 mm outer radius of outer cylinder=35 mm
Kinetic parameters	angular velocity of input rotor=500~1500 rpm mass moment of inertia of flywheel= 9.45 × 10 ⁻⁴ kg · m ² (Model 1 ER clutch and aluminium flywheel)
Thermal properties	conductivities -ER fluid: $k = 0.16 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$ -outer cylinder: $k_o = 170 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$

(3) 적외선 온도계를 이용하여, 시간에 따른 ER 클러치 외원통 표면의 온도를 측정한다.

(4) ER 클러치 외원통의 표면온도가 정상상태로 진입하면, ER 클러치의 동력전달 성능실험을 수행한다.

(5) (1)-(4)과정에서 측정한 ER 클러치 외원통의 표면온도를 이용해 ER 유체온도를 계산한다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 고전압 증폭기의 응답

고전압 증폭기의 전형적인 응답은 Fig. 6과 같다.

고전압상태에서 약간의 리플(ripple)이 관찰되며, 증폭기 ON과 OFF시의 시상수는 각각 0.0048 (sec), 0.0265 (sec)이었다. 고전압의 방전시 콘덴서(condenser)에서의 지연효과(delay effect)로 시상수가 크게 나타나며, 이와 같은 고전압 증폭기에서의 시간지연이 ER 클러치의 작동속도를 느리게 만드는 주된 원인이 됨을 알 수 있다.

4-2. ER 클러치의 동력전달 성능실험 결과 및 고찰

4-2-1. ER 클러치의 전형적인 응답

Fig. 7과 Fig. 8은 전단 각속도에 따른 ER 클러치의 토크 및 각속도 응답이며, 제 1 보에서 기술했던 이론 해석결과와 부합하는 응답형태를 가짐을 알 수 있다. 한편 Fig. 7과 같은 토크응답에서 발생하는 두 개의 최고점(peak point)은, ER 유체의 빠른 고체화에 의한 ER 토크가 구동모터의 각속도를 순간적으로 변화시키기 때문에 발생하며, 이와 같은 변동은 Fig. 8의 각속도응답에서도 나타난다.

4-2-2. 작용면적에 의한 영향

선행 연구(제 1, 2 보)의 해석결과에 따르면, ER 클

러치의 동력전달 성능을 결정짓는 요인은, ER 효과 (ER effect)와 관성영향(Inertial effect) 및 온도의존성 (Temperature dependency)으로 요약되며, ER 유체 작용면적의 적절한 설계로 최적의 성능을 보장할 수 있다. 이러한 개념을 가지고 설계된 ER 클러치 Model 2와 기존의 Model 1과는 Fig. 9와 같은 토크 전달 성능 차이를 보인다.

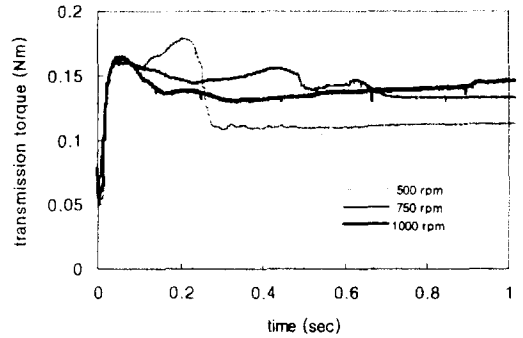


Fig. 7. Typical torque response of ER clutch.

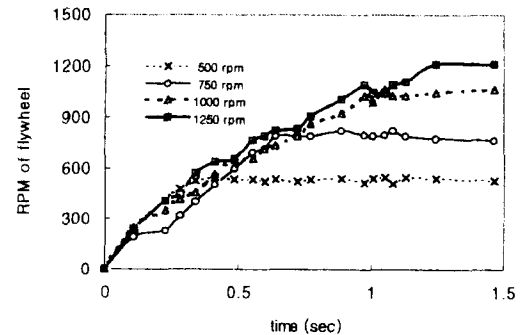


Fig. 8. Typical angular velocity response of ER clutch.

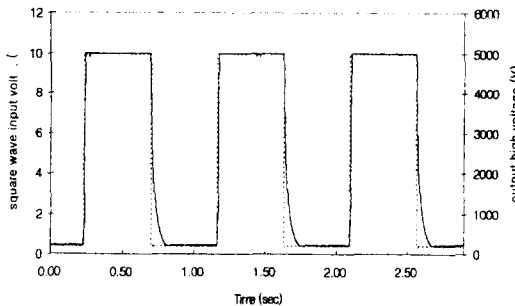


Fig. 6. Typical response of high voltage amplifier.

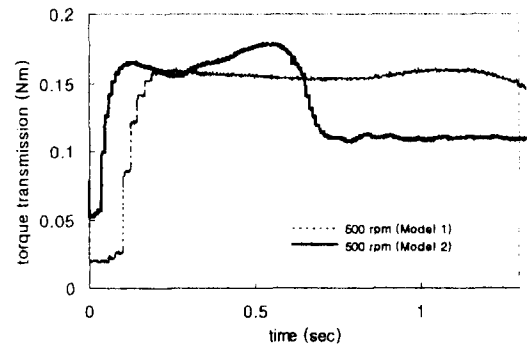


Fig. 9. Torque response of ER clutch according to active area.

Model 2의 토크 응답이 Model 1보다 더 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있고 가속시의 구동토크도 더 크게 나타남을 알 수 있다.

4-2-3. 전단 각속도 및 관성에 의한 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 ER 클러치 Model 1과 Model 2에 대해, 전단 각속도와 관성이 ER 클러치의 시상수에 미치는 영향을 각각 나타낸 것이다.

제1보에서의 해석결과와 유사하게 전단 각속도 및 관성영향은 직선적으로 나타남을 확인할 수 있고, 작용면적에 의한 영향으로 ER 클러치 Model 2의 시상수가 Model 1보다 더 작게 나타남을 알 수 있다.

4-3. ER 유체의 온도상승에 위한 성능변화 실험결과

4-3-1. ER 유체의 온도상승

Fig. 12와 Fig. 13은 ER 유체가 각각 뉴토니안 유체와 빙햄소성체로 작용할 때, 시간에 따른 외원통 표면온도의 상승을 나타낸 것이다. 표면온도 상승곡선의 정상상태 값에서 산출되는 ER 유체의 온도는 Fig. 14

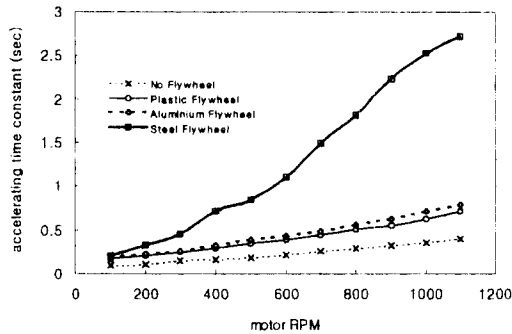


Fig. 10. Time constant of ER clutch according to shearing angular velocity with output rotor inertia; Model 1.

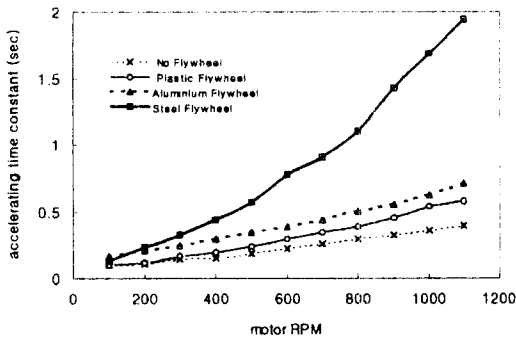


Fig. 11. Time constant of ER clutch according to shearing angular velocity with output rotor inertia; Model 2.

및 Fig. 15와 같으며, 뉴토니안 유체 거동시의 약간의 온도변동은 대기온도의 변화(23~25°C)에 의한 것으로 생각된다. 제 2 보에서 제시한 ER 유체 온도상승 모델

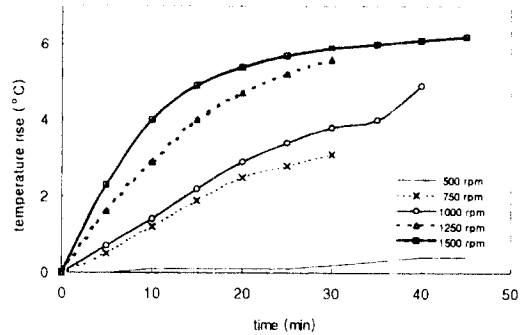


Fig. 12. Outer surface temperature of outer cylinder according to shearing time with shearing angular velocity; Newtonian fluid (no electric field, atmosphere temperature 23~25°C).

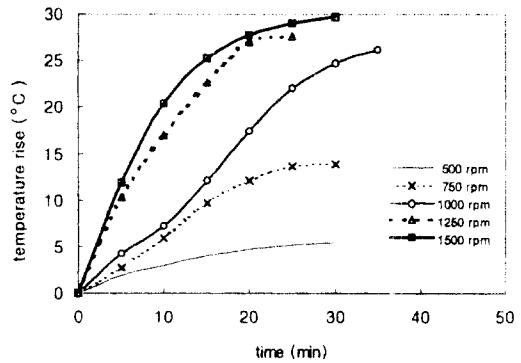


Fig. 13. Outer surface temperature of outer cylinder according to shearing time with shearing angular velocity; Bingham plastic (2.5 kV/mm electric field, atmosphere temperature (23~25°C)).

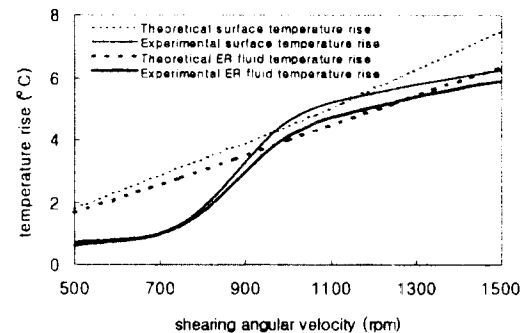


Fig. 14. Comparison between theoretical and experimental results; Newtonian fluid.

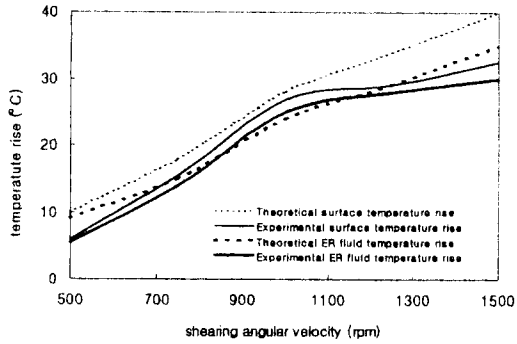


Fig. 15. Comparison between theoretical and experimental results; Bingham plastics.

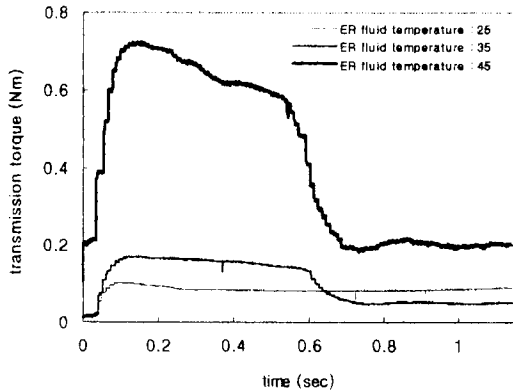


Fig. 16. Torque response of ER clutch with ER fluid temperature.

을 이용한 이론값들과 비교해 보면, 모델의 부합성을 확인할 수 있다.

4-3-2. ER 유체 온도에 따른 ER 클러치의 성능변화

Fig. 16과 Fig. 17은 ER 유체의 온도에 따른 ER 클러치의 토크 및 각속도 응답을 각각 나타낸 것이다. 본 연구에서 선정된 ER 유체는, 20~45°C의 온도범위 내에서 ER 유체 온도가 증가함에 따라 항복 전단응력이 증가하는 온도 의존성을 보이므로, 시상수가 점점 감소해가는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

ER 클러치의 동력전달 메커니즘에 대한 연구의 제 3보로서, 기하학적·운동역학적 파라미터와 ER 유체의 물성 및 온도상승에 의한 성능변화를 실험을 통해 고찰하고, 이론 해석적인 선행 연구의 주요 결과와 비

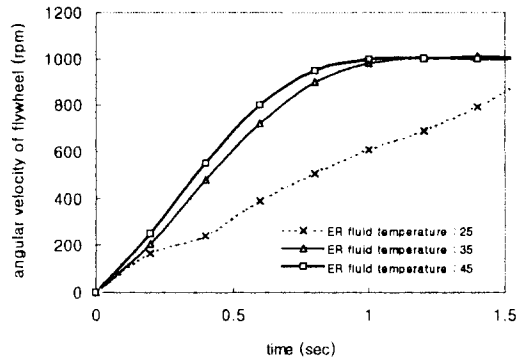


Fig. 17. Angular velocity response of ER clutch with ER fluid temperature.

교 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고전압 증폭기에서의 시간지연(time delay)은, 변압회로에 인가된 전위가 방전되는 과정에서 나타나며, ER 클러치의 작동 시상수를 크게 만드는 주된 원인이 된다.

2. 제1보에서 기술한 최적설계 개념을 가지고, 본 연구에서 제안한 ER 클러치(Model 2)는 기존의 ER 클러치(Model 1)에 비해 작동속도 및 동력전달 면에서 우수하며, 이는 작용면적의 증가와 관성의 감소를 통해 ER 클러치 작동 성능의 향상을 이룰 수 있다는 사실을 나타낸다.

3. 전단 각속도 및 출력로터 관성의 증가에 따라 ER 클러치의 시상수는 선형적으로 증가하며, 이는 제1보에서의 이론 해석결과와 유사하다.

4. 전단 각속도에 따른 ER 유체의 온도상승 추이를 실험적으로 고찰한 결과, 제2보에서 제시한 ER 유체 온도상승 모델의 타당성을 확인할 수 있었다. 이 예측 모델은 ER 클러치의 설계시나 제어를 위한 모델링 과정에서 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 과학기술처에서 시행한 특정연구과제(미니기전요소 설계기술)의 연구결과와 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이규한, 심현해, 김창호, 임윤철, "전기유변성 클러치

- 의 동력전달 메커니즘, 제1보: 동력전달 메커니즘의 해석적 전개," 한국운활학회지, 제13권, 제2호, pp. 27-38, 1997
2. 이규한, 심현해, 김창호, 임윤철, "전기유변성 클러치의 동력전달 메커니즘, 제2보: 전기유변성 유체의 온도상승에 의한 성능변화 예측," 한국운활학회지, 제13권, 제3호, 1997
 3. Thomas C. Halsey & James E. Martin, "Electro Rheological Fluid," Scientific American, Oct, 1993.
 4. Z.Y. QIU, L. HU, M.W. etc , "Temperature Effects of Dielectric Properties of ER Fluid," Proceedings of the 5th International Conference Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and Associated Technology", pp.486-492, July 1995.
 5. Frank E. Filisko, "Rheological Properties and Models of Dry ER Materials," Proceedings of the 5th International Conference Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and Associated Technology", pp. 116-128, July 1995.
 6. M.V.Gandhi & B.S.Thompson, *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, pp.137-155, 1992.
 7. BAYER AG. Provisional Production Data-TP AI 3565.
 8. Wei Chenguan & Wei Aixia, "The Research in the Applications of ER Technology in Engineering," Proceedings of the International Conference Electrorheological Fluids", pp.465-469, Oct. 1991.
 9. A.B. Douglas, "Selection of Commercial Electro-Rheological Devices," Proceedings of the 4th International Conference Electrorheological Fluids", pp.424-441, July 1993.
 10. D.J. Brookfield & Z.B. Dlodlo, "Transfer Function Identification of an Electro Rheological Actuator," Proceedings of the 5th International Conference Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and Associated Technology", pp.300-317, July 1995.
 11. A. R. Johnson, J. Makin, W.A. Bullough, "Electro-Rheological Catch/Clutch : Inertial Simulations," Proceedings of the 5th International Conference Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and Associated Technology", pp.493-515, July 1995.