

전기유변성 클러치의 동력전달 메커니즘

제1보: 동력전달 메커니즘의 해석적 전개

이규한 · 심현해* · 김창호* · 임윤철**

연세대학교 기계공학과 대학원
*한국과학기술연구원 트라이볼로지연구소
**연세대학교 기계공학과

Power Transmission Mechanism of Electrorheological Clutch

Part I: Analytical development of power transmission mechanism

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. This device responses very rapidly when controlled by rapid and continuous electrical signal and can form a servosystem. Wear, noise and vibration during operation is very low level. This study was undertaken to investigate substitutive possibilities of this ER clutch for existing power transmission mechanism. An analytic relationships using rheological model (so called, ‘Bingham plastic model’) of ER fluid were developed, and operation constraints and optimum design concepts were constructed. With this relationships, typical responses of ER clutch and effects of changing geometric, kinetic parameters of ER clutch and ER fluid properties were described. In conclusion, compared with existing mechanisms, an excellent performance of ER clutch was confirmed.

Key words—ER clutch, ER fluid, bingham plastic model, power transmission mechanism, performance analysis.

1. 서 론

최근 산업이 고속 정밀화 됨에 따라, 회전동력의 전달 및 제동 체계에 있어서도 기계구조에 손상을 입히지 않고, 보다 빠르고, 정밀하며, 능동적으로 외부환경 변화에 적응하면서, 동작할 수 있는 성능이 요구되고 있다. 이러한 기술적인 필요에 의해, 전자클러치(electric-magnetic clutch), ABS 브레이크와 같은 동력 전달 및 제동시스템이 개발 상용화 되었고, DC 서보모터와 같은 토크 액추에이터의 성능이 보다 향상되는 등, 관련 분야에 많은 발전을 이루게 되었다[1]. 그러나 전자클러치나 ABS 브레이크의 경우에도, 동력

전달의 기본적인 메커니즘이 기계구조의 직접적인 접촉에 의해 이루어지기 때문에, 마모 및 파손 문제, 마찰에 의한 소음 및 진동 문제, 불확실한 작동환경에 대한 적응성 및 빠른 응답성 등이 문제로 제기되고 있으며, DC 서보모터는 회전시에 전기자(armature)와 고정자(stator) 사이의 자기저항(magnetic reluctance) 변화에 의한 토크 변화로 정의되는 cogging과 같은 단점을 가지고 있다[2].

이상과 같은 동력전달 요소들의 단점을 개선하고, 최근 산업이 요구하는 기술적인 필요를 만족시키기 위해, 최근에 ‘전기유변성(electro-rheological; 이하 ‘ER’이라 칭함) 클러치’라는 새로운 개념의 동력전달 시스템

템이 제안되었다. 이 시스템은 지능 재료(*smart material*) [3]의 일종인 ER 유체[4]를 응용한 것으로서, 기계 구조에 마모 및 파손, 소음 및 진동을 거의 일으키지 않고, 외부 환경의 불확실한 변화에 능동적으로 대처할 수 있으며, 빠르고 연속적인 응답특성을 가지는 장점이 있다. 그러나 이 시스템의 동력전달 메커니즘 및 성능에 영향을 미치는 작동 파라미터 및 기하학적 설계변수에 관한 연구가 부족한 실정이므로, 본 논문은 ER 클러치의 동력전달 메커니즘에 관한 연구의 제 1 단계로서, ER 유체의 유변학적 거동에 근거한 ER 클러치의 작동 메커니즘을 규명하고, ER 클러치의 작동을 위한 구속조건을 정립하며, ER 유체의 특성 및 ER 클러치의 작동 파라미터에 따른 성능변화를 해석적으로 고찰하여, ER 클러치의 최적설계를 위한 설계 개념을 정립하고자 하였다.

2. ER 유체 및 ER 클러치

2-1. ER 유체

ER 유체는 기존의 뉴토니언(*Newtonian*) 유체와는 다르게, 전기장(*electric field*)의 변화에 의해 항복 전단 응력(*yield shear stress*)이 전기장의 함수로 변화하는 물질로서, Fig. 1과 같이 절연액체에 전도성미시입자를 분산시킨 것이다. 일단 전기장이 가해지면, 전도성 미시입자는 전기분극(*polarization*) 효과에 의해 두 극성을 모두 가지는 쌍극자(*dipole*)가 되고, 이 쌍극자가 두 전극사이에서 전기적 인력에 근거한 사슬(*chain*)을 형성하면서 Fig. 2와 같이 고체화(*solidification*)되며, 일단 고체화된 ER 유체는 사슬의 전기적 인력에 의해

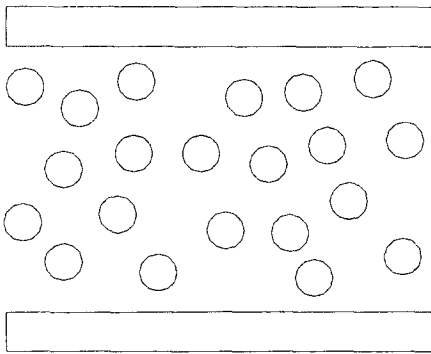


Fig. 1. Dispersed state of ER fluid at zero-field strength.

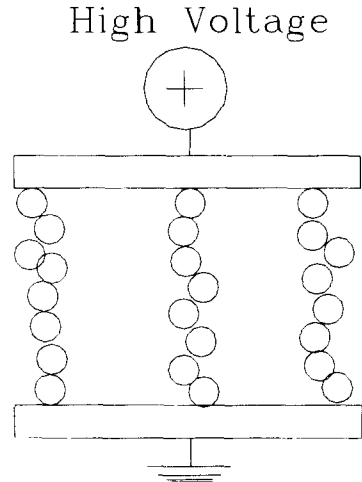


Fig. 2. Particle chaining state of ER fluid at high electric field strength.

어떤 일정한 응력(*static yield stress*; 정적항복응력) 이하의 응력에 대해 저항하는 성질을 갖게 된다[5].

이러한 미시적인 거동은 ER 유체가 유변학(*rheology*)의 견지에서 빙햄 소성체(*Bingham plastics*)로 알려진 Fig. 3과 같은 물질의 거동을 보이게 하는 근원적인 메커니즘이 되며, 상술한 ER 유체의 빙햄 소성체 거동은 다음과 같은 식 (1)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau &= \eta \dot{\gamma} + \tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) & |\tau| &\geq |\tau_y| \\ \dot{\gamma} &= 0 & |\tau| &\leq |\tau_y| \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 τ 는 ER 유체의 전단응력(*shear stress*), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비(*shear rate*), η 는 소성점도(*plastic viscosity*), τ_y 는 전기장세기에 의해 변화하는 항복전단응력(*yield shear stress*)을 나타낸다.

이상과 같은 거동을 보이는 ER 유체의 유용한 특징

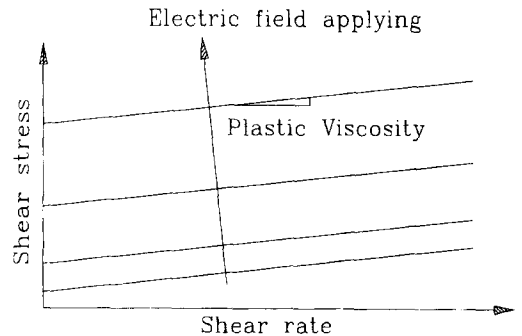


Fig. 3. The Bingham plastic behavior of ER fluid.

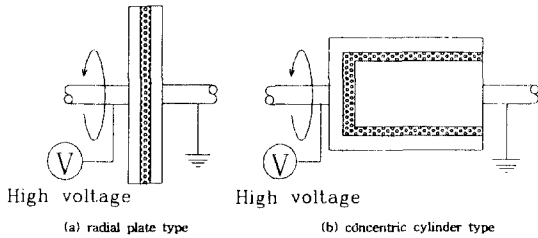


Fig. 4. Types of ER clutch.

은 전기장 강도(electric field intensity)의 증가(또는 감소)에 의해 유체의 항복 전단응력이 증가(또는 감소)되어지며, 그 변화의 범위가 비교적 넓고 연속적(stepless)이며 가역적(reversible)이라는 것과, 그 변동속도가 매우 빠르다는 것이다[6].

2-2. ER 클러치

ER 클러치는 앞서 기술했던 ER 유체의 전기장에 따른 빙핵 거동특성과 빠르고 연속적인 응답특성을 이용한 것으로서, 클러치로서의 기능뿐만 아니라 토크 엑추에이터로도 적용이 가능하다.

현재까지 제안된 ER 클러치의 형식은 다양하나 Fig. 4와 같은 원판형(radial plate type) 및 동심 원통형(concentric cylinder type)의 두 형식으로 크게 분류할 수 있으며, ER 유체 작용면(active area)의 형상 및 크기가 중요한 설계 변수가 된다. 이 형식 중 본 논문에서는 동심원통형 ER 클러치를 다루었고, 이의 작동원리를 간략히 기술하면, 기존의 마찰 접촉식 클러치와는 상이하게, 회전하는 구동부와 부하가 걸려있는 종동부가 ER 유체로 채워진 간극에 의해 분리되며, 전기장의 부재 하에서는 유체의 초기 점성 마찰토크만이 전달될 뿐이다. 이 때 ER 클러치에 전기장을 가하면, ER 유체의 고체화에 의한 항복응력 증가로 동력을 전달하게 된다[7]. 이러한 작동원리는 상황에 따라 가변적인 동력 전달이 요구되는 시스템에서, 전기장에 의해 제어되는 클러치 및 토크 엑추에이터로의 사용을 가능케 하는 것이다.

3. 동심원통형 ER 클러치의 해석

3-1. 회전 동심원통 사이의 빙핵소성체 거동

동심원통형 ER 클러치에서, 가해진 전기장에 대한 ER 유체의 거동을 해석하기 위해, Fig. 5(a)와 같은 유

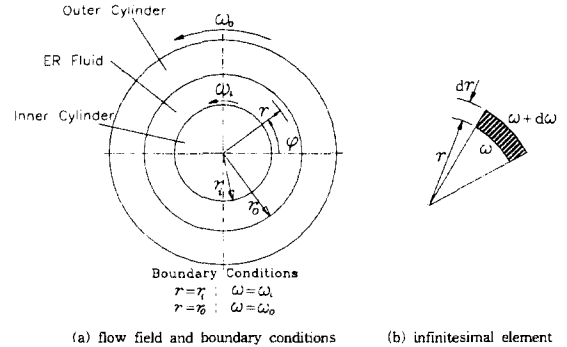


Fig. 5. Layout for ER clutch analysis.

동장과 경계조건에서 정상 비압축성 빙핵소성거동을 고찰한다. 이 해석시, 원통의 길이는 반지름에 비해 충분히 길어 유동장이 2차원 유동을 유지한다고 가정하였고, 중력의 영향은 무시하였다.

3-1-1. 빙핵소성체의 거동방정식

기하학적 특성에 의해 속도성분은 오직 접선성분(주속도성분)만이 존재하며, Fig. 5(b)와 같은 유동장 내 미소요소를 고려하면 유일한 각변형 속도성분은 식 (2)로 표시된다. 또한 접선방향의 압력구배가 존재하지 않으므로 유체층의 박리(separation)가 일어나지 않으며, 따라서 역류($\dot{\gamma} < 0$)는 발생하지 않는다[8].

$$\dot{\gamma} = r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) \tag{2}$$

Fig. 5(a)와 같은 유동장에서의 빙핵소성체 거동은 항복 전단응력 τ_y 에 의해 전단영역 ($|\tau| \geq \tau_y$)과 강체영역 ($|\tau| \leq \tau_y$)으로 구분되며 식 (3), (4)와 같다[9-12].

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\left[\eta + \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} \right]} = r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) \quad : \text{slip zone } |\tau| \geq \tau_y \tag{3}$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad : \text{rigid zone } |\tau| \leq \tau_y \tag{4}$$

한편, 축방향의 접촉길이(wetted length)를 L 이라고 할 때, 전유동장에 걸쳐 전파되는 토크와 전단응력의 평형식은 식 (5)으로 표현되며, 기하학적 특성과 접선방향의 운동량 방정식으로부터, 전달토크는 전유동장에 걸쳐 일정하다[8].

$$T + (2\pi r^2 L) \tau = 0 \tag{5}$$

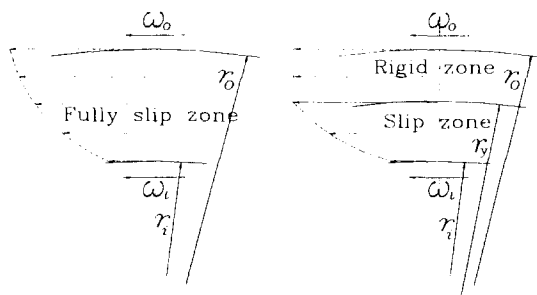
식 (5)와 식 (3), (4)로부터 다음과 같은 각속도 분포를 얻는다.

$$w(r) - w(r_o) = -\frac{T}{2\pi\eta L} \int_{r_o}^r \frac{dr}{r^3} - \frac{\tau_y}{\eta} \int_{r_o}^r \frac{dr}{r} \quad (6)$$

여기서, r_o 는 유동장의 경계, 또는 강제영역의 경계에 대한 반경방향 좌표값이다.

3-1-2. 강제영역의 생성 및 성장에 대한 해석

빙핵소성체의 항복 전단응력의 크기에 따라, 유동장 내의 전단영역 및 강제영역의 분포가 달라지게 되며, 회전 동심원통의 경우, 전달토크가 전유동장에 걸쳐 일정해야 하므로, 식 (5)에 의하면 전단응력이 최소가 되는 외원통 표면에서 강제영역이 생성되어 성장하게 된다. 따라서 다음과 같은 두 경우로 나누어 해석하며, 전형적인 각속도 분포는 Fig. 6으로 나타난다.



(a) a fully slip zone (b) a coexistence of slip and rigid zone

Fig. 6. Typical angular velocity distributions.

3-1-2-1. 전유동장이 전단영역인 경우 (a fully slip zone)

전유동영역; $r_i \leq r \leq r_o$, $|\tau| \geq \tau_y$

$$T = \frac{4\pi\eta L}{\left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2}\right)} \left[(w_o - w_i) + \frac{\tau_y}{\eta} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \right] \quad (7)$$

$$w = w_i + \frac{T}{4\pi\eta L} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_i^2} \right) - \frac{\tau_y}{\eta} \ln\left(\frac{r}{r_i}\right) \quad (8)$$

3-1-2-2. 전단영역과 강제영역이 공존하는 경우 (a coexistence of slip and rigid zone)

i) 전단영역; $r_i \leq r \leq r_y$, $|\tau| \geq \tau_y$

$$T = -\frac{4\pi\eta L}{\left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_y^2}\right)} \left[(w_o - w_i) + \frac{\tau_y}{\eta} \ln\left(\frac{r_y}{r_i}\right) \right] \quad (9)$$

$$w = w_i + \frac{T}{4\pi\eta L} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_i^2} \right) - \frac{\tau_y}{\eta} \ln\left(\frac{r}{r_i}\right) \quad (10)$$

ii) 강제영역; $r_y \leq r \leq r_o$, $|\tau| \leq \tau_y$

$$T = -2\pi r_y^2 L \tau_y \quad (11)$$

$$w = w_{rigid} = w_o \quad (12)$$

여기서 r_y 는 빙핵소성체의 항복위치를 나타내며, 전유동장에 대해 전달토크는 일정하므로 식 (13)의 관계가 성립된다.

$$\left(\frac{r_y}{r_i}\right)^2 - \ln\left(\frac{r_y}{r_i}\right) = 1 + \frac{2\eta}{\tau_y} (w_o - w_i) \quad (13)$$

따라서 외원통 상면에 강제영역이 최초로 생성되는 항복 전단응력 τ_y 와 토크 T 는 다음과 같다.

$$\tau_y = \frac{2\eta(w_o - w_i)}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) - 1} \quad (14)$$

$$T_I = -2\pi r_o^2 L \tau_y \quad (15)$$

또한 이상과 같은 두 경우에서의 동력 손실은 식 (16)으로 표현된다.

$$P_{loss} = T(w_o - w_i) \quad (16)$$

한편 외 내원통의 각속도 차이가 존재하는 경우, 전유동장이 강제영역이 되는 조건은, 항복 반경이 내원통 반경으로 접근할 때($r_y \rightarrow r_i$), 항복 전단응력이 무한대($\tau_y \rightarrow \infty$)가 되어야 하나, 실제 ER 클러치는 출력로터의 각속도가 가속되므로, 이는 후술하기로 한다.

3-2. 전기장 강도 변화에 따른 ER 클러치의 동력전달 해석

3-2-1. 전기장 강도와 항복 전단응력의 관계식

일반적으로 ER 클러치에 인가되는 전기장은 고전압(대개 0~5 kV)에 의한 것으로서, 제어 입력 전압(대개 0~10 V)을 고전압 증폭기(High Voltage Amplifier)

로 증폭시킨 것이다. 따라서 전기장 강도 $E(t)$ 는 제어 입력전압 $V_i(t)$ 에 대한 고전압 증폭기의 거동이 포함된 것이라고 할 수 있고, 계단형 제어입력전압(step control input voltage) $V_i(t)|_{\infty} = V_i$ 에 대한 전기장 강도는 식 (17)로 표현된다.

$$E(t) = k_v V_i \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_v}} \right] \quad (17)$$

여기서 k_v 와 τ_v 는 각각 고전압 증폭기의 이득(gain)과 시상수(time constant)이다.

한편, 현재까지의 우수한 실험에 근거하여 ER 유체의 항복 전단응력과 전기장 강도는 식 (18)로 관련지어지며 A , n 은 ER 유체의 특성치이다[13].

$$\tau_y = AE^n \quad (18)$$

3-2-2. ER 클러치의 동작을 위한 구속조건

전기장 부재 시에 ER 클러치의 출력로터는 회전속도가 0이어야 하며, 전기장이 인가되면 입력로터의 회전속도까지 가속되어야 한다. 따라서 출력로터부에 걸려있는 저항토크 T_o 가 초기 점성 마찰토크 T_v 보다는 크고, ER 유체에 의해 발생시킬 수 있는 최대토크 T_{max} 보다는 작아야 한다. 즉

$$|T_v| \leq |T_o| < |T_{max}| \quad (19)$$

한편, 상술한 구속조건 하에서 강제영역의 생성조건에 따라 다음과 같은 두 경우가 존재한다.

i) $|T| < |T_o|$; 전단영역만 존재

$$|T| < \left| \frac{-4\pi r_o^2 \eta L (w_o - w_i)}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 2\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) - 1} \right| \quad (20)$$

ii) $|T| > |T_o|$; 전단영역과 강제영역이 공존.

$$|T| > \left| \frac{-4\pi r_o^2 \eta L (w_o - w_i)}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 2\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) - 1} \right| \quad (21)$$

3-2-3. 출력로터의 동작단계별 해석

외원통이 입력로터, 내원통이 출력로터인 ER 클러치를 생각하면, 저항토크 T_o 를 받고 회전 질량관성이 인 출력로터의 각속도 변화에 의해 다음과 같은 두

단계로 동작하게 된다.

i) 정지상태(rest state): $w_i = 0$

ER 클러치의 전달토크가 저항토크보다 작은 경우 ($|T| \leq |T_o|$)이며 $|T| \geq |T_o|$ 일 때 출력로터가 가속되기 시작한다.

ii) 가속상태(accelerating state): $w_i = 0 \rightarrow w_o$

출력로터의 가속상태는 제어입력전압이 계단함수(step function)로 가해지고 고전압 증폭기가 식 (17)과 같은 거동을 하므로, 무한대 가속시간(infinite accelerating time)의 극한조건(limit condition)이 된다. 따라서 출력로터의 가속시간은 입력로터와의 각속도 차이가 0.1% 이내로 되었을 때, 즉 0.1% 정착시간(settling time)으로 기술한다.

한편, 가속시 출력로터부의 회전관성과 가속도의 영향을 ER 클러치의 전달토크와 관련지으면 식 (22)와 같다.

$$|T| - T_o = I \frac{dw_i}{dt} \quad (22)$$

여기서 ER 클러치의 전달토크 T 는 ER 유체의 거동조건에 따라 3-1-2절에서 기술한 관계와 식 (17)과 같은 고전압 증폭기의 거동이 포함되어 적용된다.

4. 해석결과 및 고찰

ER 클러치의 동력전달 성능은 출력로터의 가속 시상수(accelerating time constant) 및 유체층의 전단에 의한 동력손실(power loss)에 의해 규정된다. 따라서 이에 대한 해석을 위해 기하학적·운동 역학적 파라미

Table 1. Reference data sheet

	active area of output rotor
Geometrical parameters	- active diameter=30 (mm)
	- active length=55 (mm)
	electrode gap=1 (mm)
Kinetic parameters	angular velocity of input rotor=1000 (rpm)
	resistive torque=0.02 (Nm)
	mass moment of inertia of flywheel= 4.300×10^{-4} (kg·m ²)
ER fluid properties	plastic viscosity=0.1 (Pas)
	yield shear stress: $\tau_y = AE^n$ (Pa) ($A=0.000521$, $n=1.8614$)
High Voltage Amplifier	amplification gain=500
	time constant=0.0048 (sec)

터 및 ER 유체의 특성 파라미터를 고려하였고, 비교를 위한 기준값들을 Table 1과 같이 설정하였다.

4-1. ER 클러치의 전형적인 응답(Typical response of ER clutch)

ER 클러치의 파라미터 영향을 기술하기 전에, 시간 및 전기장에 따른 ER 토크, 출력로터의 각속도, 동력손실, 강체영역의 전파 경향을 우선 고찰한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 ER 클러치 전달토크 및 출력로터 각속도의 전형적인 응답이다. 시상수(time constant)와 감쇠비(damping ratio)가 존재하는, 고전압 증폭기와 ER 클러치가 결합된 2차 시스템의 응답임을 알 수 있다. Fig. 7에서 토크곡선의 초기값은 초기 점성 마찰토크 값(T_v)이고, ER 클러치의 전달토크(T)가 저항토크(T_0)와 같아지는 순간 이후부터 출력로터가 가속되기 시작하며, 이 가속점은 Fig. 8에서 각속도가 0 이상이 되는 지점이다. 출력로터의 각속도는 입력로터의 각속도로 수렴해 가며, ER 클러치의 토크는 출력로터부의 회전 질량 관성토크와 동적평형

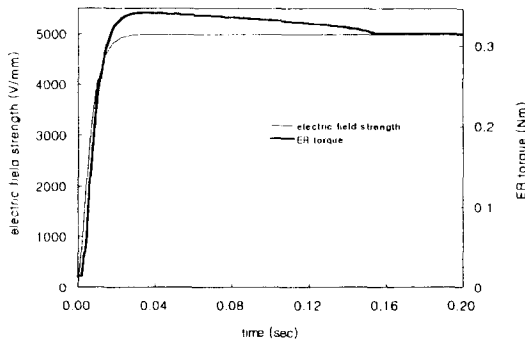


Fig. 7. Typical curve of ER torque.

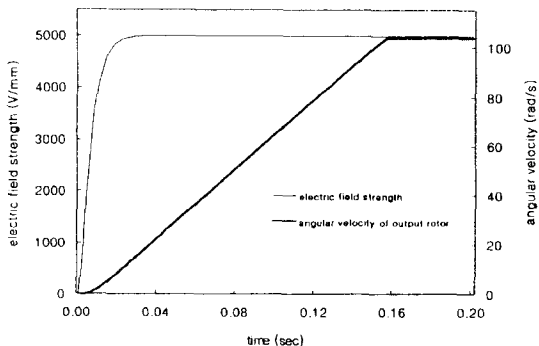


Fig. 8. Typical curve of output rotor angular velocity.

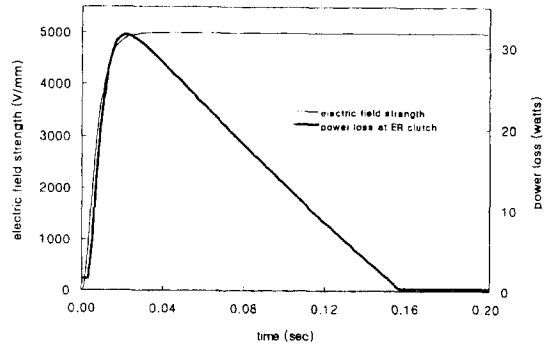


Fig. 9. Power loss at ER clutch.

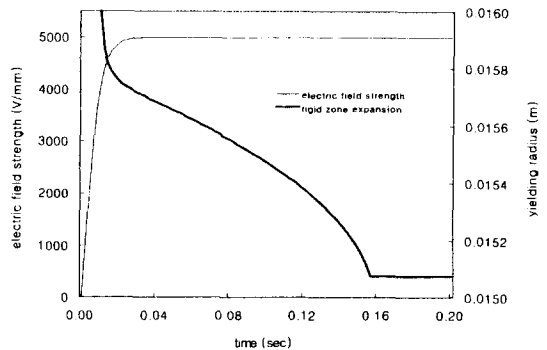


Fig. 10. Expansion of rigid zone at flow field.

(dynamic equilibrium)을 이루며 전달된다. 또한 토크 전달곡선에서 오버슈트가 나타나는 이유는, ER 유체의 전단에 의한 점성 마찰토크가 항복 전단응력에 의한 ER 토크에 부가되기 때문이며, 이는 출력로터의 각속도가 입력각속도로 가속됨에 따라서 0으로 수렴해 간다

Fig. 9는 ER 클러치의 동작시 ER 유체층의 전단에 의해 발생하는 동력손실을 나타내며, 이 곡선의 최고값(peak power loss; P_{peak})은 구동모터의 용량을 결정하는 기준이 된다. 또 Fig. 9에서 동력손실 곡선의 면적을 구하면 가속시 발생하는 에너지손실(energy loss)이 되며, 이는 실제 ER 클러치의 동작에 있어서, ER 유체의 온도를 상승시켜 미시입자의 사슬인력을 저하시키고 결국, ER 클러치의 동력전달 효율을 저하시키는 원인이 된다[15].

Fig. 10은 외원통 내표면에서 강체영역이 생성되어 전파되어 가는 경향이다. 이와 같은 강체영역이 모든 경우에 생성, 전파되는 것은 아니며 상술한 식 (20)과 (21)의 조건에 의한다.

4-2. 기하학적 파라미터의 영향(Effects of changing geometrical parameters)

ER 클러치의 기하학적 파라미터는 ER 유체의 작용면적(active area; A_{active})과 형상비(aspect ratio; AR)로 기술되며 각각의 정의는 다음과 같다.

$$A_{active} = \pi DL \tag{23}$$

$$AR = \frac{L}{D} \tag{24}$$

여기서 D 와 L 은 각각 ER 유체의 작용직경(active diameter) 및 작용길이(active length)이다.

한편, 위 두 파라미터의 사이의 관계는 Fig. 11과 같이 표현되며, 이에 의한 영향의 해석을 위해 Table 1에 기준한 수치를 이용하였다.

4-2-1. 형상비(aspect ratio)

ER 유체의 작용면적을 기준치($A_{active}=51.836 \text{ (cm}^2\text{)}$)로 고정시키고 형상비를 변화시켰을 때, 가속 시상수 및 에너지 손실량과 동력손실에 미치는 영향은 Fig. 12와 Fig. 13으로 나타난다.

Fig. 12를 관찰하면, 형상비 증가에 대해 가속 시상수는 점진적으로 증가하며 가속시간 동안의 에너지 손실량은 감소했다가 증가하는 경향을 보인다. 따라서 성능을 극대화시키는 최적점은 에너지손실을 최소화시키면서 시상수를 되도록 작게 하는 점으로 평가되며, 이 때 형상비는 2 정도가 된다. 이와 같은 성능 최적화는 기하학적 파라미터뿐만 아니라 운동 역학적 파라미터와 ER 유체의 물성치에 대해서도 동일한 개

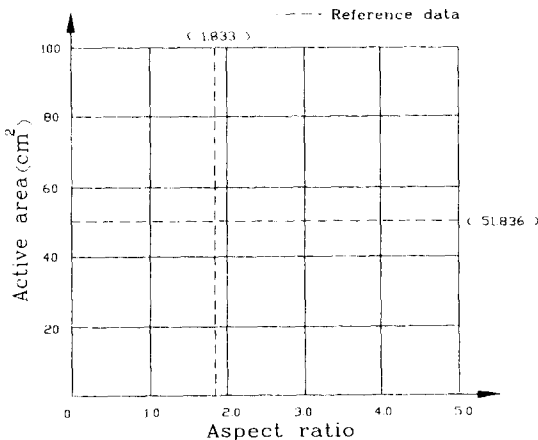


Fig. 11. Active area versus aspect ratio.

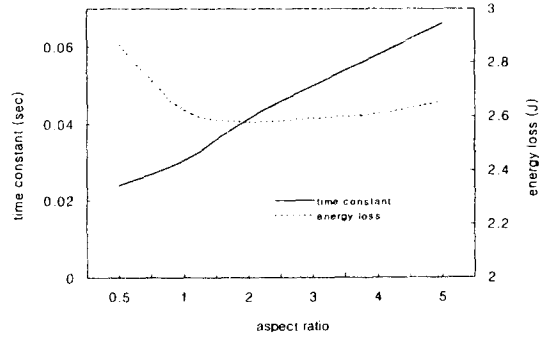


Fig. 12. Accelerating time constants and total energy losses according to aspect ratios.

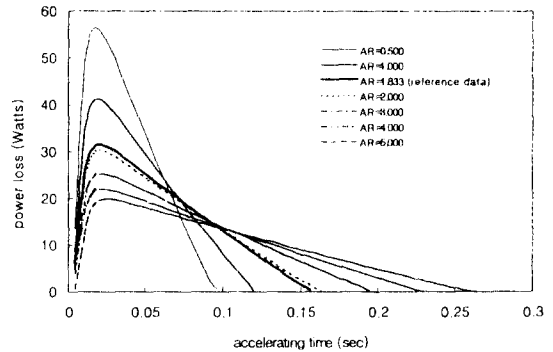


Fig. 13. Power losses according to accelerating time with aspect ratios.

념으로 수행될 수 있으며, 결국 ER 클러치의 최적 설계문제로 연계된다. Fig. 12와 같은 에너지 손실곡선의 최소값 존재이유는, 형상비 증가에 따른 가속 시상수의 증가효과와 Fig. 13과 같은 동력손실 곡선의 최고값 감소효과가 절충되어 나타난 것이다.

4-2-2. 작용면적(active area)

ER 클러치의 형상비를 기준치($AR=1.833$)로 고정시키고 작용면적을 변화시켰을 때의 가속 시상수 및 에너지 손실량에 미치는 영향은 Fig. 14로 나타난다.

작용면적이 증가할 때 가속 시상수는 0.038 (sec)의 최소값을 갖고 감소, 증가하며 에너지 손실량은 2.583 (J)의 최소값을 갖고 감소, 증가한다. 시상수의 변동 경향은 작용면적의 증가에 따라, 시상수를 증가시키는 출력로터 회전 질량관성의 영향과 시상수를 감소시키는 ER 효과에 의한 토크전달의 영향이 절충되어 나타난 것이며, 이상과 같은 결과로부터 성능 최적점은 130 (cm²) 정도의 작용면적으로 평가된다.

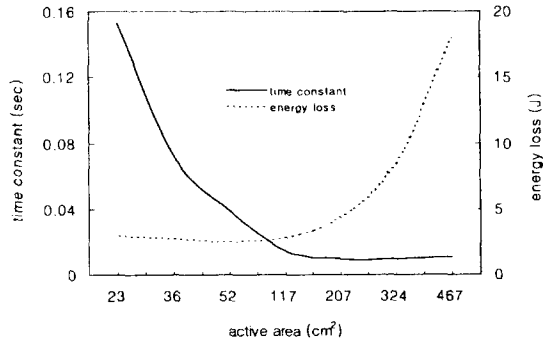
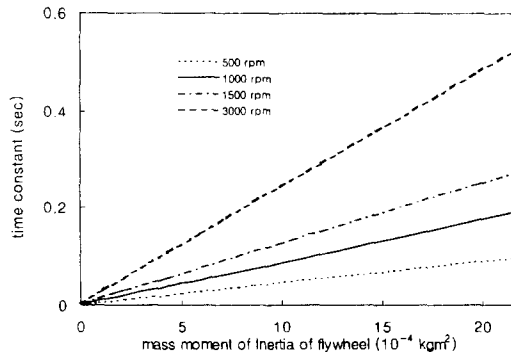


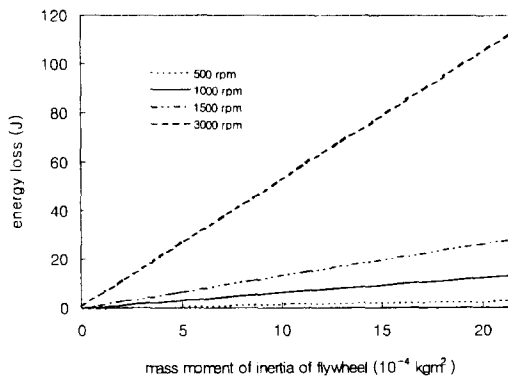
Fig. 14. Accelerating time constants and total energy losses according to active areas.

4-3. 운동 역학적 파라미터의 영향(Effects of changing kinetic parameters)

ER 클러치의 운동 역학적 파라미터는 회전에 대한



(a) time constants



(b) energy losses

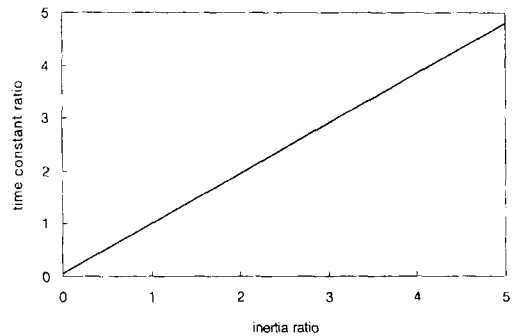
Fig. 15. Time constants and energy losses according to mass moment of inertias with angular velocities.

질량관성과 입력로터의 각속도로 기술되며, 기하학적 파라미터와 ER 유체의 특성 파라미터를 Table. 1과 같이 고정한 후 플라이휠의 관성과 입력각속도의 영향을 고찰하였다.

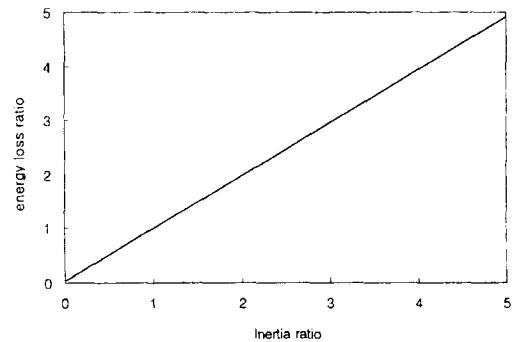
Fig. 15는 시상수와 에너지손실에 대한 운동 역학적 파라미터의 영향을 표시한 것이며, 여기서 초기의 편차값은 ER 클러치 출력로터만의 관성영향이 된다. 한편, Table 1에서 설정된 플라이휠 관성과 입력각속도를 1로 두고 상대적인 변화를 표현하면 Fig. 16과 같은 결과가 도출되며, 따라서 회전관성 및 입력각속도가 시상수 및 에너지 손실에 미치는 영향은 거의 1:1의 선형적인 비례관계로 성립된다고 말할 수 있다.

4-4. ER 유체의 특성에 의한 영향(Effects of changing ER fluid parameters)

ER 유체의 특성 파라미터는 전기장 강도(E)에 따른 항복 전단응력(τ)의 생성곡선에서 정의되는 역치 전기장 강도(threshold electric field strength; E_0)와 ER 유



(a) time constant ratios



(b) energy loss ratios

Fig. 16. Time constant ratios according to inertia ratios with input angular velocity ratios.

체가 전기장 강도의 최대값에 대해 생성시킬 수 있는 최대 항복 전단응력(maximum yield shear stress) 및 ER 유체의 소성점도(plastic viscosity; η)로 기술되며, 다른 파라미터값을 Table 1의 수치로 고정시키고 이에 따른 영향을 고찰하였다.

4-4-1. 역치 전기장 강도(threshold electric field strength)

역치 전기장 강도(E_0)는 Fig. 17과 같이 도식적으로 정의되며, ER 효과가 본격적으로 일어나는 역치값으로서, 전기장 강도(E)에 따른 항복 전단응력(τ) 생성 곡선의 최대 기울기(S)와 전기장 강도축의 교점으로 정의한다[16]. 이 값 이후의 ER 효과는 전기장 강도에 대해 민감하게 증가하게 되며, ER 액추에이터를 제어할 때 매우 중요한 특성이 된다.

동일한 최대 항복 전단응력에 대해, 전기장 강도(E)에 따른 항복 전단응력(τ) 생성 곡선들의 기울기와 역치 전기장 강도의 값을 Fig. 18과 같이 설정하여, 이

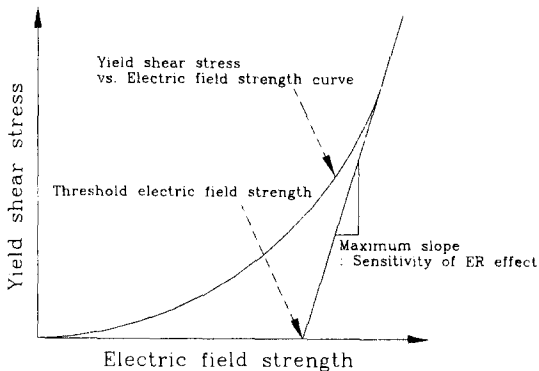


Fig. 17. Determination of threshold field strength.

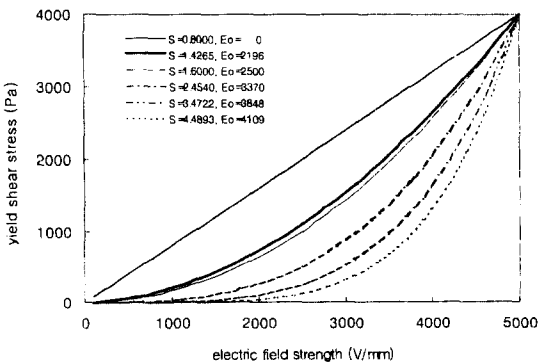


Fig. 18. Slopes and threshold field strengths according to yield shear stress vs electric field curves.

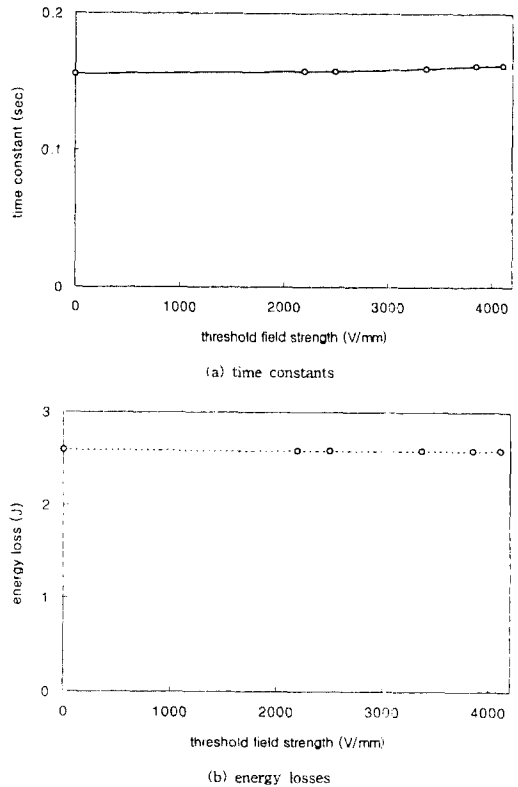


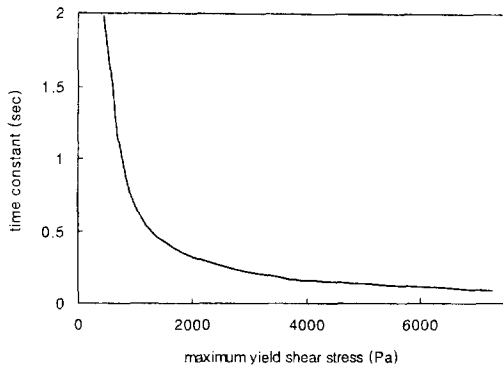
Fig. 19. Time constants and energy losses according to threshold field strength.

것이 가속 시상수 및 에너지 손실에 미치는 영향을 고찰하였고, Fig. 19와 같이 거의 영향이 없음을 확인하였다. 따라서 동일한 최대 항복 전단응력을 내는 ER 유체 중에서 역치 전기장 강도가 되도록 작은 것을 선정하면, 해석된 바와 같은 가속 성능을 보장하면서도 제어의 범위를 넓일 수 있는 이익을 얻게 된다.

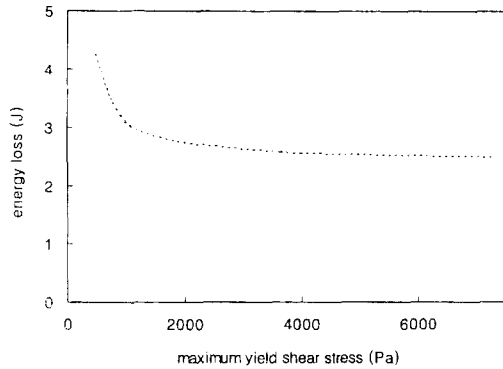
4-4-2. 최대 항복 전단응력(maximum yield shear stress)

역치 전기장 강도의 영향(최대 기울기의 영향)은 거의 없으므로, ER 유체의 항복 전단응력에 의한 영향(또는 항복 전단응력에 의해 생성된 ER 토크에 의한 영향)은 최대 항복 전단응력만으로 기술이 가능하며, 이는 Fig. 20과 같다.

최대 항복 전단응력의 증가에 대해 가속 시상수 및 에너지 손실은 초기에는 급격히 감소하다가 점차적으로 완만히 감소하며, 이는 ER 유체의 항복 전단응력에 의해 발생하는 ER 토크가 출력로터의 가속에 미치



(a) time constants



(b) energy losses

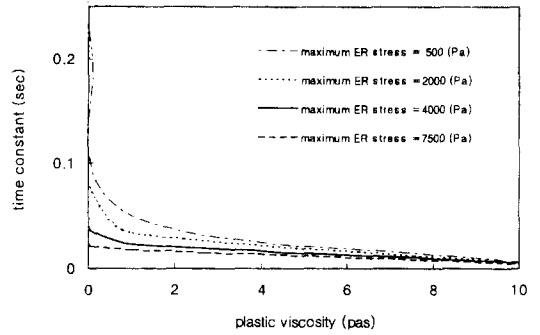
Fig. 20. Time constants and energy losses according to maximum yield shear stress.

는 영향이 어느 토크값 이상부터는 매우 작아지게 된다는 것을 의미한다. 따라서 Table 1과 같이 설정된 작동조건에서 4000 Pa 정도의 최대 항복 전단응력을 갖는 ER 유체를 사용하면, 0.2 (sec)와 2.75 (J) 정도의 비교적 만족할 만한 시상수와 에너지손실을 보장할 수 있다. 또 최대 항복 전단응력 증가에 따라 가속 시상수는 고전압 증폭기의 시상수로 수렴되며, 이 사실로부터 고전압 증폭기의 시상수가 ER 클러치 가속 성능의 한계값이 됨을 알 수 있다.

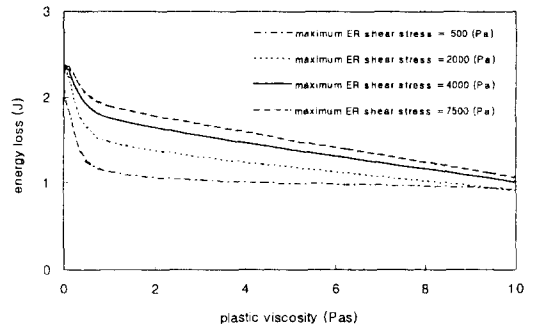
4-4-3. 소성점도(Plastic viscosity)

ER 유체의 소성점도는 유체층의 전단속도비 변화에 따른 전단응력 변화로 정의되며, 점성 마찰토크에 의한 영향을 기술하는 파라미터가 된다. Table. 1으로 작동조건을 고정시키고 저항토크 값을 초기 점성 마찰토크와 같게 설정한 후, 소성점도의 영향을 기술하면 Fig. 21과 같이 표현된다.

소성점도 증가에 대한 가속 시상수 및 에너지 손실



(a) time constants



(b) energy losses

Fig. 21. Time constants and energy losses according to plastic viscosity with maximum yield shear stress.

은 최대 항복 전단응력에 의한 경향과 유사하며, 이는 점성 마찰토크에 의한 출력로터 가속효과가 어느 토크값 이상부터는 매우 적어 진다는 것을 의미한다. 한편, 소성점도에 의한 영향은 ER 유체의 최대 항복 전단응력에 의해 영향을 받으며, 항복 전단응력이 클수록 소성점도에 의한 가속효과는 작아지게 된다. 따라서 ER 유체의 교체화에 의한 동력전달 성능을 지배하는 유체 물성 파라미터는 최대 항복 전단응력임을 알 수 있다.

4-5. ER 클러치의 최적 설계개념(Optimum design concept of ER clutch)

ER 클러치의 동력전달 성능을 지배하는 각종 파라미터들의 영향을 종합적으로 고찰한 결과, Fig. 22와 같은 ER 클러치 최적 설계개념이 도출된다.

기하학적, 운동 역학적 파라미터 및 ER 유체 물성 파라미터의 조합에 따라 ER 클러치의 작동을 지배하는 두 효과, 즉 ER 효과와 관성효과가 절충되며, 결국 동력전달 성능을 기술하는 두 파라미터, 즉 가속 시상

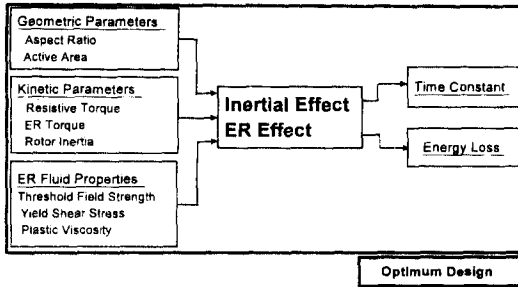


Fig. 22. Optimum Design Problem of ER Clutch.

수와 에너지 손실이 결정된다. 이와 같은 개념을 컴퓨터 프로그램화 하면, ER 클러치의 형상 및 성능 최적화를 수행할 수 있다.

5. 결 론

ER 클러치의 동력전달 메커니즘에 대한 연구의 제 1 보로서, 전기장에 따른 ER 유체의 빙행거동을 동심원통형 ER 클러치에서 해석하였고 기하학적, 운동 역학적 파라미터와 ER 유체의 물성에 따른 성능 변화를 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동심원통형 ER 클러치의 경우, 간극 내에서 강제영역의 생성 및 전파는 빙행소성거동을 하는 ER 유체의 항복 전단조건에 따라 결정되며, 초기생성은 외원통 내표면에서 이루어진다.

2. ER 클러치의 동작을 위한 구조조건은 초기 점성 마찰토크(T_v)와 ER 유체가 발생시킬 수 있는 최대토크(T_{max}) 및 출력로터부의 저항토크(T_o)로 기술되며, $|T_v| \leq |T_o| < |T_{max}|$ 의 조건식으로 표현된다.

3. ER 클러치의 기하학적, 운동역학적 파라미터 영향은 출력로터부의 관성효과와 ER 유체 작용면에서의 ER 효과가 상호 관련되어 나타나며, ER 클러치의 동력전달 성능지수인 시상수 및 에너지손실 면에서 최적설계가 이루어질 수 있다.

4. ER 유체의 특성 파라미터에 대한 해석결과로서, 역치 전기장 강도로 대표되는 ER 효과의 민감도는 ER 클러치 성능에 거의 영향을 미치지 않으며, 최대 항복 전단응력과 소성점도의 영향이 지배적임을 확인하였고, ER 클러치의 작동조건과 연계된 그 값의 절충점을 평가하였다.

5. 이상의 연구에서 평가된 ER 클러치의 성능은 Table 1과 같은 일반적인 작동환경에서, 시상수와 에

너지 손실이 각각 0.18 (sec)와 3 (J) 정도이었고, 따라서 다른 동력전달요소나 액추에이터와 비교할 때, 작동속도(operating speed)와 유연성(flexibility) 및 적응성(adaptability)면에서 우수한 대체 기전요소(mechanical element)가 될 수 있음을 확인하였다.

기 호

- A_{active} : ER 유체의 작용면적
- AR : 형상비
- D : ER 유체의 작용직경
- E : 전기장 강도
- E_o : 역치 전기장 강도
- h : 전극 사이의 간격
- l : 극 질량 관성 모멘트
- L : ER 유체의 작용길이
- P_{loss} : 동력손실
- P_{peak} : peak power loss
- γ : 유동장 내 반경
- γ_i : 내원통의 외반경
- γ_o : 외원통의 내반경
- γ_f : ER 유체의 항복 반경
- γ_{α} : 유동장 경계 및 강제영역 경계에서의 방향 좌표값
- S : 전기장 강도에 따른 항복 전단응력 생성곡선의 최대 기울기, 또는 ER 효과의 민감도
- T : ER 클러치의 전달토크
- T_i : 강제영역이 최초로 생성되는 전달토크
- T_o : 저항토크
- T_v : 초기 점성 마찰토크
- T_{max} : 최대 전달토크
- V_l : 제어입력전압
- $\dot{\gamma}$: ER 유체의 전단속도비
- τ : ER 유체의 전단응력
- τ_y : 전기장에 따른 ER 유체의 항복 전단응력
- τ_{yl} : 강제영역이 최초로 생성되는 항복 전단응력
- η : ER 유체의 소성점도
- w : 유동장 내 ER 유체의 각속도
- w_{rigid} : 강제영역의 각속도
- w_i : 내원통의 각속도
- w_o : 외원통의 각속도

후 기

이 논문은 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업(미니기전요소 설계기술)의 연구결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 월간-자동차기술 편집부, "산업용 액추에이터," pp. 73-86, 성안당, 서울특별시, 1995.
2. Brookfield, D.J. & Dlodlo, Z.B., "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.
3. Gandhi, M.V. & Thompson, B.S., "Smart Materials and Structures," Chapman & Hall, pp. 137-155, 1992.
4. Douglas, A.B., "Selection Of Commercial Electro-Rheological Devices," Proceedings of the 4th International Conference Electrorheological Fluids", pp. 424-441, July 1993.
5. Thomas, C.H. & James, E.M., "Electro Rheological Fluid," Scientific American, Oct, 1993.
6. 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.
7. 김기우, 최승복 & 정재천, "ER 브레이크 시스템의 능동장력 제어," 대한기계학회지, pp. 805-809, 1995.
8. 이상환, 맹주성 & 손명진, "유체역학," 제삼권, pp. 626-635, 회중당, 서울특별시, 1992.
9. Leek, T.H., etc, "Hydrodynamic Pressure Generation With An Electro-Rheological Fluid. PART I-Unexcited Fluid," Proceedings of the 4th International Conference Electrorheological Fluids", pp. 608-624, July 1993.
10. Leek, T.H., etc, "Hydrodynamic Pressure Generation With An Electro-Rheological Fluid. PART II-Excited Fluid," Proceedings of the 4th International Conference Electrorheological Fluids", pp. 625-642, July 1993.
11. Atkin, R.J., "Two Dimensional Bingham Plastic Flow In A Cylindrical Pressurised Clutch," Proceedings of the 4th International Conference Electrorheological Fluids," pp. 526-537, July 1993.
12. John, A. Tichy, "Hydrodynamic lubrication theory for the Bingham plastic flow model," Inc. J. Rheology, 35(4), May 1991.
13. Jang, Y.J., Suh, M.S., Yeo, M.S. & Choi, S.B., "The Numerical Analysis on Channel Flows of ER Fluid," Proceedings of the 5th International Conference Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and Associated Technology", pp. 764-771, July 1995.
14. 김종식, "선형 제어시스템공학," pp. 106-133, 청문각, 서울특별시, 1994.
15. Smyth, R., Tan, K.H. & Bullough, W.A., "Heat Transfer Modelling Of A Cylindrical ER Catch," Proceedings of the 4th International Conference Electrorheological Fluids", pp. 657-675, July 1993.
16. BAYER AG. Provisional Production Data-TP AI 3565.