

전기 유변성 클러치를 이용한 회전관성체의 위치제어

고봉춘 · 심현해* · 김창호* · 김권희**

고려대학교 대학원 기계공학과

*한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

**고려대학교 기계공학과

Angular Position Control of a Rotor with Electro-Rheological Clutch

Bongchun Ko, Hyun-Hae Shim*, Chang-Ho Kim*, Kwon-hee Kim**

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Korea University

*Tribology Research Center, KIST

**Department of Mechanical Engineering, Korea University

Abstract - ER clutch is a device using electro-rheological fluid which is one of so called intelligent materials. Power transmission behavior of an ER clutch can be controlled by electrical field applied to the fluid. In this work, a new type of servomechanism is developed with two ER clutches, driven by two electrical motors rotating in reverse directions. The concentric cylinder type ER clutch is operated by PID control. The system shows good angular position control characteristics with respect to sinusoidal and square inputs.

Key Words : ER Fluid, ER Clutch, Position control, PID Controller

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발달에 따라 기존의 기구 장치들이 가지고 있는 단점들인 진동, 소음, 마찰 그리고 부품의 마모 및 파손등을 극복하기 위하여 전기 유변성 유체(electro-rheological fluid; 이하 ER 유체라 칭함)를 응용한 기구 장치들이 많이 연구되고 있다. 1940년대에 ER 효과가 발표되었고 1980년대 이후 ER 유체와 그의 응용분야에 대한 활발한 연구가 시작되었다[1,2,3].

ER 유체의 응용분야 중 ER 클러치가 동력 전달과 기전요소에서의 응용으로 연구되고 있다[4,5,6]. 현존하는 기전 요소들은 관성이 크고 복잡한 구조를 가지고 있다. 특히 현재 많이 사용하고 있는 DC 서보 모터는 소위 코깅(cogging)이라 불리는 회전시의 토크변화를 나타내는데 이는 전기자의 회전시 정류자의 영향과 모터의 자기회로의 전기자와 고정자사이의 자기 저항의 변화에 기인한다[7]. 이는 로봇제어 등의 응용에 많은 문제를 가져오게 되며 특히 모델기준 보상기법 사용시 심각

하다[8]. 따라서 본 연구에서는 진동, 소음, 마찰 및 부품의 마모와 파손이 거의 없으며 외부환경의 불확실한 변화에 능동적으로 대처할 수 있으며 빠르고 연속적인 응답특성을 가지며 작동할 수 있는 ER 클러치를 설계하여 기전 요소로서의 응용으로 서보기구를 구성하였으며 DC 서보모터의 대체기기로 제안하고자 한다. ER 클러치는 구조적으로 매우 단순하며 ER 유체의 전단응력에 의해 전달토크가 결정되기 때문에 제어구조 또한 매우 단순하다.

ER 클러치를 이용한 회전관성체의 위치제어를 위하여 전기장과 전달토크와의 관계식을 유도하였으며 ER 클러치 및 위치제어 시스템을 모델링하였다. 또한 산업 현장에서 가장 많이 쓰이는 PID 제어기를 이용하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 회전관성체의 위치제어를 수행하였다.

2. ER 유체의 특성

질연액체에 전도성미시입자를 분산시킨 ER유체는 전기장 무부하시에는 입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체상태에서 전기장이 인가되면 Figure. 1과 같이 분극이 발생된 입자들이 서로 연결하여 전극을 향하여 사슬(chain)을 형성하여 유체에 가해지는 외부 전단력에 대해 저항을 하게 된다. 이러한 ER 유체의 거동은 다음과 같은 빙햄(Bingham) 소성체모델을 이용하여 식(1),(2)와 같이 표현할 수 있다

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(E) \quad (1)$$

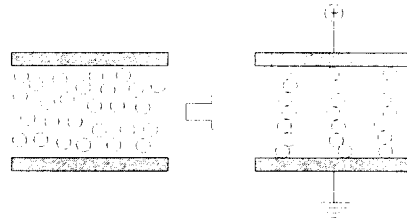


Fig. 1 Field dependent characteristics of ER fluid

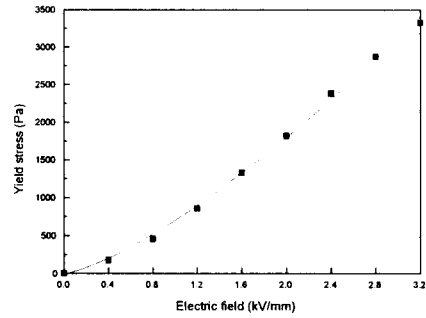


Fig. 2 Yield stress vs. electric field of the ER Fluid

$$\tau_y(E) = \alpha E^\chi \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단응력, $\tau_y(E)$ 는 항복전단응력, η 는 ER 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률, E 는 전기장의 세기를 나타낸다. 이 때 항복전단응력은 식(2)와 같이 전기장의 지수함수의 형태로 표현되며 α 와 χ 는 ER 유체의 고유치로 실험을 통해 Fig. 2와 같이 식(2)의 형태로 근사화해서 구한다[9,10].

본 연구에 사용된 ER 유체인 독일의 Bayer사의 TP AI 3565의 특성치는 Fig.

2와 식(3)과 같다[11].

$$\tau_y(E) = 699.948E^{1.359} \quad (3)$$

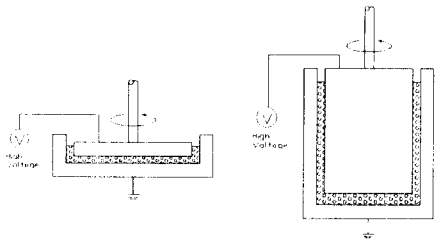
($E : kV/mm$, $\tau_y : Pa$)

3. ER 클러치의 모델링

현재까지 제안된 ER 클러치의 형식은 다양하나 Fig. 3과 같이 원판형과 동심 원통형의 두 형식으로 크게 분류할 수 있으며[5], 본 연구에 사용된 ER 클러치는 동심원통형으로 설계되었다. 작동원리를 간략히 기술하면, 회전하는 구동부와 부하가 걸려있는 종동부가 ER 유체로 채워진 간극에 의해 분리되어 있고 전기장이 인가되지 않을 경우에는 ER 유체의 초기점성에 의한 토크만이 전달될 뿐이다. 이 때 ER 클러치에 전기장을 가하면 ER 유체의 항복응력의 증가로 동력을 전달하게 된다.

설계된 ER클러치의 단면도는 Fig. 4와 같다.

외원통은 DC모터와 연결되어 정속도로



(a)

(b)

(a) Radial Type

(b) Concentric cylinder type

Fig. 3 Types of ER clutch

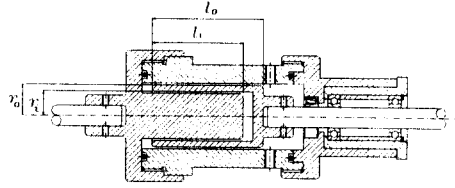


Fig. 4 Cross section of the ER clutch

전하고 내원통은 토크 트랜스듀서와 관성체에 연결되어 전기장에 의해 제어되어 회전한다. 외원통과 내원통의 사이는 ER 유체로 채워지고 두 원통의 간극은 1mm로 유지된다.

ER 유체의 항복응력에 의해 전달되는 토크는 전기장에 의해 제어가 가능하며 그 크기는 발생하는 ER 유체의 항복전단응력을 전체면적에 대하여 적분하여 얻을 수 있다. 이것을 수식으로 나타내면 식(4)와 같다

$$\begin{aligned} T(E) &= \int_A r \tau da \\ &= r_i \int_0^{l_i} \tau_y(E) (2\pi r_i dl) \\ &\quad + r_o \int_0^{l_o} \tau_y(E) (2\pi r_o dl) \\ &= 2\pi(r_i^2 l_i + r_o^2 l_o) \tau_y(E) \\ &= 2\pi(r_i^2 l_i + r_o^2 l_o) a E^x \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 r_i 은 내원통의 내부 반지름, r_o 은 내원통의 외부 반지름, l_i 은 내원통의 내부길이, l_o 은 내원통의 외부길이를 나타낸다.

외원통과 내원통의 각속도 차는 ER 유체의 점성에 의한 토크를 발생시키는데 그

크기는 ER 유체의 점성에 의한 전단응력을 전체면적에 대하여 적분하여 얻을 수 있으며 식(5)와 같다. 단 반경에 비해 간극이 작으므로 유동을 평판유동으로 가정하였으며 간극이 1mm보다 큰 부분은 전단 변형률이 작으므로 무시하였다.

$$\begin{aligned}
 T(\omega) &= \int_A r \tau dA \\
 &= \int_0^{l_i} r_i \eta \dot{\gamma} (2\pi r_i dl) + \int_0^{l_o} r_o \eta \dot{\gamma} (2\pi r_o dl) \\
 &= 2\pi r_i^2 l_i \eta \dot{\gamma} + 2\pi r_o^2 l_o \eta \dot{\gamma} \\
 &= 2\pi r_i^2 l_i \eta \frac{(r_i - h)\omega_0 - r_i \omega}{h} \\
 &\quad + 2\pi r_o^2 l_o \eta \frac{(r_o + h)\omega_0 - r_o \omega}{h} \\
 &= \frac{2\pi \eta}{h} \left[\{r_i^3 l_i + r_o^3 l_o + r_o^2 l_o h - r_i^2 l_i h\} \omega_0 \right. \\
 &\quad \left. - \{r_o^3 l_o + r_i^3 l_i\} \omega \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서 η 는 ER 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률, ω_0 는 외원통의 각속도, $\omega (= d\theta/dt)$ 는 내원통의 각속도, h 는 간극을 나타낸다.

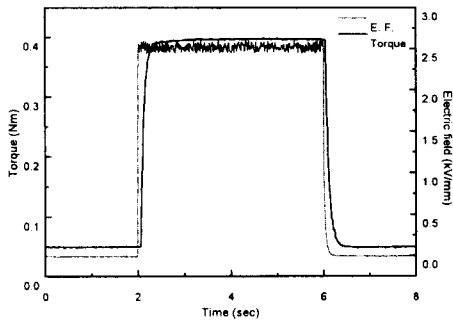


Fig. 5 Transient response to step input of the ER clutch

ER 클러치의 동특성을 알아보기 위해 계단입력(step input)에 대한 과도응답(transient response) 실험을 수행하였다.

ER 클러치의 동적 모델링에 있어서 ER 유체의 거동에 대하여 아직까지는 해석적인 접근이 어려우므로 실험적인 방법을 사용하여 모델링을 하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 여기서 ER 클러치는 2% 정착시간의 1/4값인 약 97.7 msec의 시상수를 갖는 전기장에 대한 1차 시스템임을 알 수 있다. 따라서 ER 클러치의 모델을 식(6)과 같이 비교적 간단한 1차식의 형태로 표현할 수 있다.

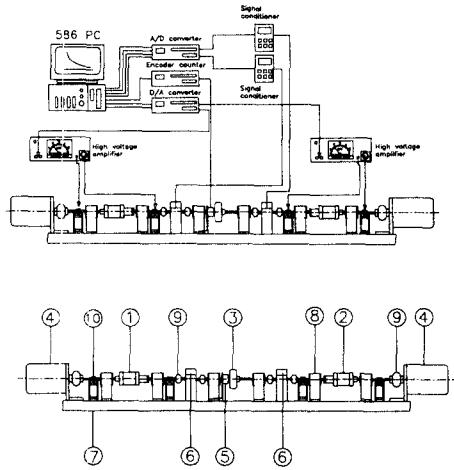
$$\begin{aligned}
 T &= 2\pi(r_i^2 l_i + r_o^2 l_o) a E^x \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right) \right\} \\
 &\quad + \frac{2\pi \eta}{h} \left[\{r_i^3 l_i + r_o^3 l_o + r_o^2 l_o h - r_i^2 l_i h\} \omega_0 \right. \\
 &\quad \left. - \{r_o^3 l_o + r_i^3 l_i\} \omega \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서 t_c 는 ER 클러치의 시상수를 나타낸다.

4. 위치제어 시스템 모델링

알루미늄 재질의 회전 관성체의 위치제어를 수행하기 위하여 Fig. 6와 같은 위치제어 시스템을 구성하였다. Fig. 7의 두 개의 모터는 서로 반대방향으로 정속으로 회전하며 클러치로 동력을 전달한다. 이때 전기장의 크기와 방향에 따라 두 개의 클러치는 서로 반대방향으로 동력을 각각 전달하게 된다. 회전하는 축에 고전압을 가하기 위해 슬립 링(slip ring)을 클러치와 연결되는 축에 부착하였다. 고전압으로부터의 절연과 토크 트랜스듀서에 전달

되는 진동을 줄이기 위해 고무 플렉시블 커플링(rubber flexible coupling)을 사용하였고 이에 의한 축의 처짐 방지를 위해 두 개의 베어링(bearing)을 사용하여 축을 지지하였다. 축의 처짐은 축의 진동발생은 물론이고 클러치의 내부에서 원통간의 간극을 유지하지 못하게 하는 원인으로 정확한 측정을 위해 반드시 피해야 한다.



- ① ER clutch A ② ER clutch B
- ③ Rotor ④ DC motor
- ⑤ Optical encoder ⑥ Torque sensor
- ⑦ Base ⑧ Bearing race
- ⑨ Flexible coupling ⑩ Slip ring

Fig. 6 Schematic diagram of experimental configuration

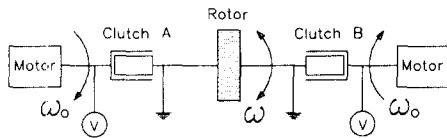


Fig. 7 Motion of the Rotor and Motors

베어링은 고전압이 베이스(base)에 전달되는 것을 막기 위해 절연재로 베이스와 절연되어 있다.

축, 커플링 등의 비틀림 관성을 무시하면 시스템은 회전관성과 점성에 의한 댐핑토크, 시스템에서 상대운동을 하는 요소들의 접촉면에서 발생하는 마찰토크를 가지는 시스템으로 모델링을 할 수 있다. 또한 두 ER 클러치는 서로 반대방향으로 회전하므로 회전각 θ 의 방향을 ER 클러치 A의 회전방향과 일치시키면 ER 클러치 B에 의해 회전하는 경우는 회전속도의 부호가 음수가 되므로 회전관성체에 가해지는 토크의 계산시에 ER 클러치 B의 점성토크의 항에서 ω 대신 $-\omega$ 를 대입하고 계산해야 한다. 그러므로 ER 클러치의 점성에 의해 회전 관성체에 가해지는 점성토크는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 T\left(\frac{d\theta}{dt}\right) &= \frac{2\pi\eta}{h} \left[\{r_i^3 l_i + r_o^3 l_o + r_o^2 l_o h\right. \\
 &\quad \left. - i^2 l_i h\} \omega_0 - \{r_o^3 l_o + r_i^3 l_i\} \omega \right] \\
 &\quad - \frac{2\pi\eta}{h} \left[\{r_i^3 l_i + r_o^3 l_o + r_o^2 l_o h\right. \\
 &\quad \left. - r_i^2 l_i h\} \omega_0 - \{r_o^3 l_o + r_i^3 l_i\} (-\omega) \right] \\
 &= -\frac{4\pi\eta}{h} (r_o^3 l_o + r_i^3 l_i) \omega \\
 &= -\frac{4\pi\eta}{h} (r_o^3 l_o + r_i^3 l_i) \frac{d\theta}{dt} \quad (7)
 \end{aligned}$$

따라서 $T(d\theta/dt)$ 는 시스템의 댐핑으로 작용하게 되며 회전관성체의 운동방정식은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} &= T_A(E) - T_B(E) \\
 &\quad - T_f \quad (8)
 \end{aligned}$$

여기서 $T_A(E)$ 는 ER 클러치 A의 전기장에 의한 토크, $T_B(E)$ 는 ER 클러치 B의 전기장에 의한 토크, T_f 는 마찰토크를 나타내며 실험적으로 측정하였다.

J 값은 알루미늄 회전 관성체의 회전 관성과 내원통과 축의 회전관성의 합이 되고 B 는 시스템의 댐핑으로 식(7)의 $d\theta/dt$ 의 계수이고 식(9)와 같다.

$$B = \frac{4\pi\eta}{h} (r_o^3 l_o + r_i^3 l_i) \quad (9)$$

5. 제어기 설계 및 제어 실험

회전관성체의 위치제어를 위하여 산업 현장에서 가장 많이 사용되어지고 있는 PID제어기를 이용하여 제어를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 제어기는 식(10)과 같다.

$$E(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

여기서 $E(t)$ 는 고전압 증폭기에 가해지는 제어입력이고 $e(t)$ 는 요구 추종치인 θ_d 와 실제 회전각인 θ 와의 차이이다.

전달토크는 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터로 입력되고 회전 관성체의 회전각은 광학 엔코더(optical encoder)를 이용하여 측정되고 계수기를 통하여 컴퓨터로 입력된다. 측정된 회전각을 요구치와 비교하여 오차가 최소화되도록 연산된 제어입력은 D/A 변환기를 거쳐 고전압 증폭기로 공

급되어 500배 증폭되어 클러치를 구동시켜 제어가 이루어지게 된다.

6. 제어 실험 결과

0.5Hz 구형파 입력과 0.5Hz 정현파 입력에 대하여 위치제어 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. Fig. 8과 Fig. 9은 구형파 입력에 대한 위치제어 시뮬레이션과 실험이다. 상승시의 순간적인 각변화에 약간의 오차가 있으나 이것은 그 순간에 각속도가 무한대가 될 수 없고 관성의 효과와 클러치가 1차 시스템의 특성을 갖기 때문이다. 이 순간에 클러치는 상당히 큰 토크를 발생시키는데 이는 관성체를 크게 가속시키기 위해 소요되는 토크이다. 요구치로의 정착 후에는 오차가 거의 없이 추종하고 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 0.5 Hz 정현파 입력에 대한 위치제어 시뮬레이션과 실험이다. 구형파에서와 같은 순간적인 각변화가 없으므로 요구치에 거의 정확하게 추종하고 있다. 전기장과 토크는 파형의 형상을 따라 가해지고 있음을 볼 수 있다. 구형파에서와 같은 큰 토크도 요구되지 않는다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에서 제어입력이 양수이면 클러치 A, 음수이면 클러치 B로 입력되며 회전각과 부호가 일치한다.

7. 결 론

본 연구에서는 일반 DC모터에 ER 클러치를 부착하여 새로운 서보기구를 제안하였다. 또한 이를 이용해 구형파 입력과 정현파 입력에 대한 회전 관성체의 위치

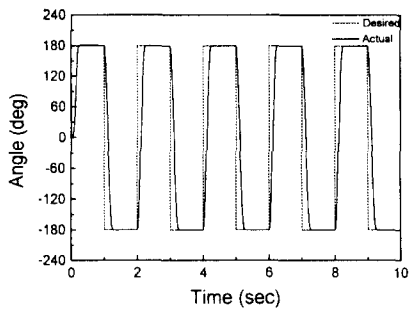
제어를 수행하였으며 구조적으로 단순하고 비교적 간단한 제어기로 우수한 제어 성능을 검증하였으며, 로봇 팔 등에 응용할 수 있을 것이다. 또한 회전운동을 직선 운동으로 바꾸어 x-y 테이블이나 생산라인의 가공물 운송 장치등 관성체를 정확히 이송해야 하는 장치에 현재의 서보시스템을 대신할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

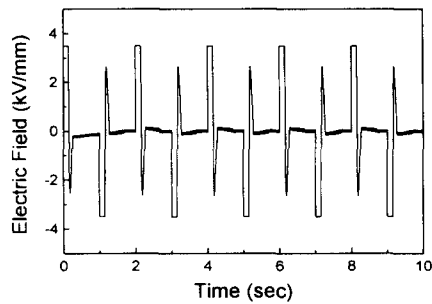
본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정 연구과제의 연구결과의 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

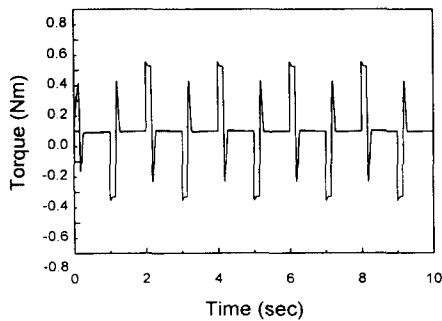
- Gandhi, M. V., Thompson, B. S., Smart Materials and Structures, pp.137-155, Chapman & Hall, 1992.
- Stanway, R., Sproston, J., L., "Electro-Rheological Fluids: A Systematic Approach to Classifying Modes of Operation," Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 116, pp.498-504, 1994.
- 최승복, 최영태, "지능재료 시스템과 구조물을 이용한 국가 기간 시설의 첨단화," 한국소음진동공학회지, 제6권, 제1호, pp.4-16, 1996
- Stevens, N. G., Sproston, J. L., Stanway, R., "An Experimental Study of Electro-Rheological Torque Transmission," Trans. of ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 110, pp.182-188, 1988.
- Johnson, A. R., Bullough, W. A., Firoozian, A., Hosseini-Sianaki, A., Makin, J., Xiao, S., "Testing on a High Speed Electro-Rheological Clutch," Proceedings of the 3th International Conference Electro-rheological Fluids, pp.424-441, 1991.
- Johnson, A. R., Martin, J., Bullough, W. A., "Electro-Rheological Catch/Clutch : Inertial Simulations," Proceedings of the 4th International Conference Electro-rheological Fluids, pp.493-515, 1993.
- 김상진, 소형모터제어, 성안당, 1997
- Brookfield, D. J., Dlodlo, Z. B., "Transfer Function Identification of an Electro-Rheological Actuator," Proceedings of the 5th International conference Electro-rheological Fluids, Magneto-rheological Suspensions and Associated Technology, pp.300-317, 1995.
- 김기우, 최승복, 정재천, "ER 브레이크 시스템의 능동 장력 제어," 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집, pp.805-809, 1995
- 이규한, 심현해, 김창호, 임윤철, "전기 유변성 클러치의 동력전달 메커니즘, 제1보: 동력 전달 메커니즘의 해석적 전개." 한국운할학회지, 제13권, 제2호, pp.27-38, 1997
- BAYER AG. Provisional Production Data - TP AI 3565



(a) Position trajectory

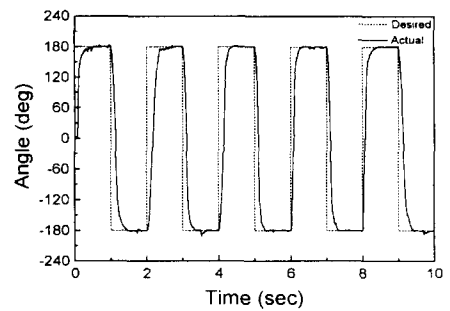


(b) Control input

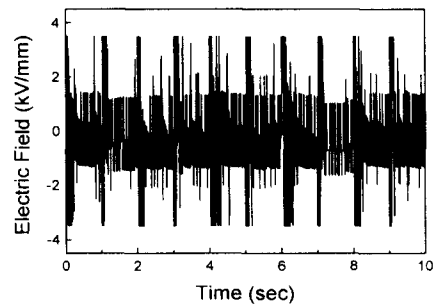


(c) Net torque ($T_A - T_B$)

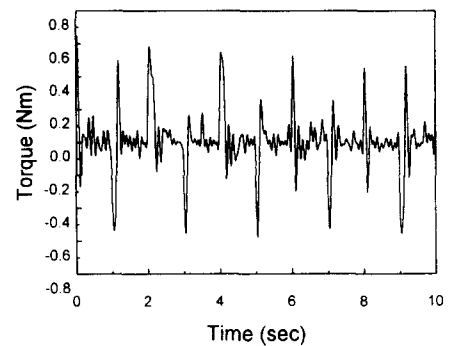
Fig. 8 Result to 0.5Hz square input with inertia (simulation)



(a) Position trajectory

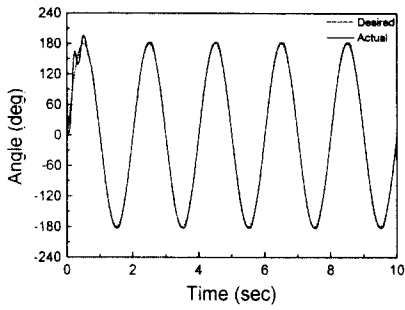


(b) Control input

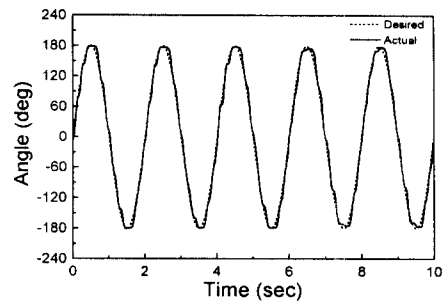


(c) Net torque ($T_A - T_B$)

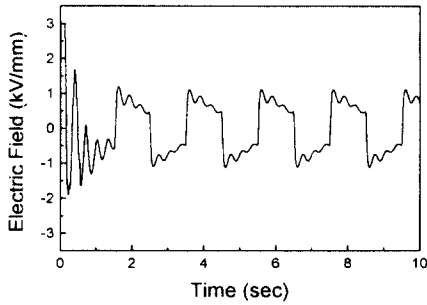
Fig. 9 Result to 0.5Hz square input with inertia (experiment)



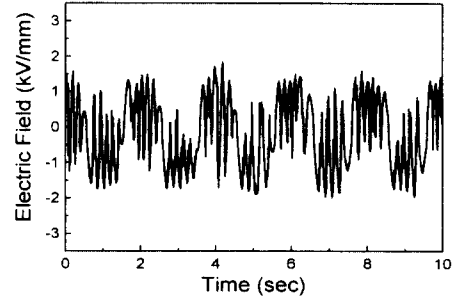
(a) Position trajectory



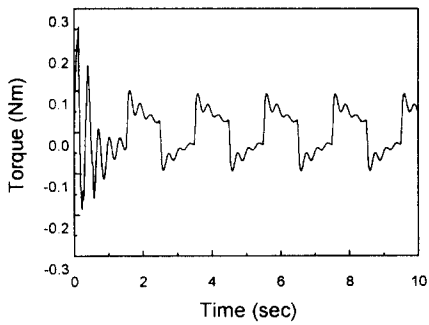
(a) Position trajectory



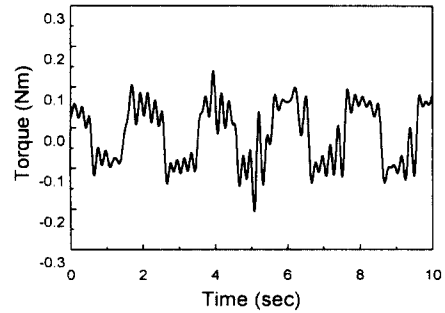
(b) Control input



(b) Control input



(c) Net torque ($T_A - T_B$)



(c) Net torque ($T_A - T_B$)

Fig. 10 Result to 0.5Hz sine input with inertia (simulation)

Fig. 11 Result to 0.5Hz sine input with inertia (experiment)