

# 의료용 햅틱 마스터의 동적 모델링과 힘 반향 제어

## Dynamic Modeling and Repulsive Force Control of Medical Haptic Master

오 종 석\*·최 승 복†

Jong-Seok Oh and Seung-Bok Choi

(2012년 2월 3일 접수 ; 2012년 2월 21일 심사완료)

**Key Words** : Haptic Master(햅틱마스터), ER Fluid(ER 유체), Repulsive Force(반력), Bi-directional Clutch/Brake(양방향 클러치/브레이크), Minimally Invasive Surgery(최소침습수술), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어)

### ABSTRACT

In this research, a new type of haptic master device using electrorheological(ER) fluid for minimally invasive surgery(MIS) is devised and control performance of the proposed haptic master is evaluated. The proposed haptic master consists of ER bi-directional clutch/brake for 2 DOF rotational motion(X, Y) using gimbal structure and ER brake on the gripper for 1 DOF rotational motion (Z). Using Bingham characteristic of ER fluid and geometrical constraints, principal design variables of the haptic master are determined. Then, the generation of torque of the proposed master is experimentally evaluated as a function of applied field of voltage. A sliding mode controller which is robust to uncertainties is then designed and empirically realized. It has been demonstrated via experiment that the proposed haptic master associated with the controller can be effectively applied to MIS in real field conditions.

### 1. 서 론

최근 의료분야에서는 Intuitive Surgical사의 Da Vinci 시스템과 같은 수술용 로봇을 활용한 최소 침습수술(minimally invasive surgery, MIS)이 널리 이용되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 이 수술법은 환부의 구멍에 수술도구와 카메라를 삽입하여 집도의가 모니터를 보면서 수술하는 것으로, 기존의 개복수술에 비하여 환자의 회복속도가 월등히 빠른 것으로 알려져 있다. 이러한 최소침습수술 시스템은 집도의가

마스터장치를 이용해서 수술용 로봇에 명령을 주게 되면 슬레이브 로봇은 이를 따라서 환자의 내부에서 명령을 수행하게 된다. 집도의는 카메라를 통해서만 환자의 상태를 알 수 있으므로, 기존 개복수술에 비하여 많은 제약을 받게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구들은 주로 마스터 장치에서 햅틱 장치를 이용한 근 감각적인 힘을 구현하는데 초점이 맞춰져 있으며, 초기에는 이를 위해 전기서보모터를 많이 사용하였다<sup>(3,4)</sup>. 하지만 이러한 시스템들은 구조가 복잡하고 기구학적 해석이 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 지능 재료를 활용한 연구가 활발히 수행되고 있다<sup>(5-9)</sup>.

이러한 연구로는 전기장이나 자기장의 입력에 의

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학부  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

해 전단저항력이 달라지는 특성을 갖는 ER(electrorheological) 유체와 MR(magnetorheological) 유체를 이용한 연구가 대표적이다. 그 중 ER 유체는 빠른 응답속도와 연속적이며 효율적인 전단응력제어가 가능한 장점을 갖고 있어 최근 활발한 연구가 진행되고 있다.

따라서, 이 연구에서는 ER 유체를 이용한 햅틱 마스터 장치를 구축하여 마스터장치의 제어성능을 실험적으로 평가하고자 한다. ER 햅틱 마스터는 2 자유도 회전운동 (X, Y)을 구현하기 위하여 짐발 (Gimbal) 구조물을 이용한 ER 양방향 클러치/브레이크와 짐발구조물의 손잡이 부분에 1자유도 회전운동 (Z)을 구현하기 위한 ER 브레이크로 구성된다. ER 유체의 빙햄모델을 고려하여 제안된 햅틱 마스터 장치의 토크 모델을 유도하였다. 유도된 토크모델을 이용하여 햅틱마스터 장치의 주요 설계변수를 결정하였으며, 이를 통해 3자유도 회전운동구현이 가능한 마스터 장치를 제작하였다. 브레이크/클러치의 발생토크는 ER 유체에 가하는 전압의 함수로써 실험적으로 평가되었다. 더불어 이 연구에서는 제어성능에 악영향을 끼치는 ER 유체의 히스테리시스 거동을 보상하기 위해 외란에 강건한 슬라이딩 모드 제어가 설계되었다. 설계된 슬라이딩 모드 제어기는 햅틱 마스터의 힘반향 추적 제어실험을 위해 구현되었으며, 제안된 3자유도 햅틱 마스터의 추적제어성능을 효과적으로 입증하였다.

## 2. ER 햅틱 마스터의 설계 및 제작

### 2.1 ER 햅틱 마스터

이 연구에서 제안하는 ER 햅틱 마스터는 Fig. 1과 같이 짐발구조물, ER 양방향 클러치/브레이크와 ER 브레이크로 구성이 된다. ER 양방향 클러치는 2자유도 회전운동 (X, Y)을 구현할 수 있으며, ER 브레이크는 짐발 구조물의 손잡이에 설치되어 1자유도 회전운동 (Z)을 구현할 수 있다. 이렇게 각 축으로 설치된 장치에서 발생한 토크는 짐발구조물의 손잡이를 통해 사용자에게 전달이 된다( $M_\phi, M_\theta, T_z$ ). 이때 전달된 토크는 다음과 같은 직교좌표계와 구형좌표계간의 좌표변환행렬식을 통해 계산될 수 있다<sup>(9)</sup>.

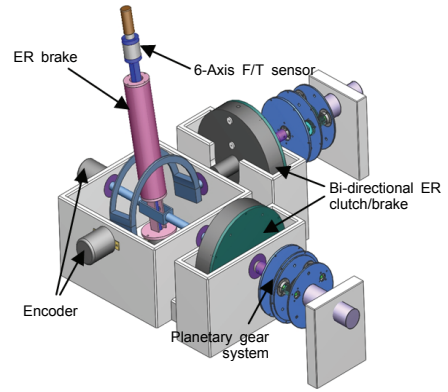


Fig. 1 Schematic configuration of the haptic master

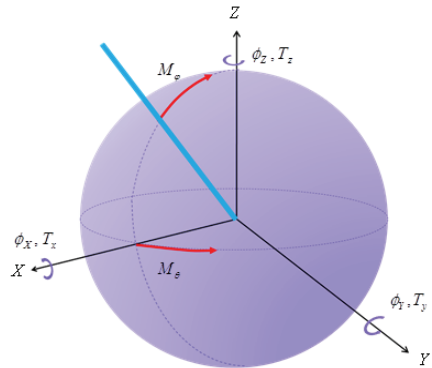


Fig. 2 Cartesian and spherical coordinate system

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_\phi \\ M_\theta \\ T_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_{11} = \frac{\tan \phi_x}{\sqrt{\tan^2 \phi_x^2 + \tan^2 \phi_y^2} (1 + \tan^2 \phi_x^2 + \tan^2 \phi_y^2) \cos \phi_x^2}$$

$$A_{12} = -\frac{\tan \phi_y}{(\tan^2 \phi_x^2 + \tan^2 \phi_y^2) \cos \phi_x^2}$$

$$A_{21} = \frac{\tan \phi_y}{\sqrt{\tan^2 \phi_x^2 + \tan^2 \phi_y^2} (1 + \tan^2 \phi_x^2 + \tan^2 \phi_y^2) \cos \phi_y^2}$$

$$A_{22} = \frac{\tan \phi_x}{(\tan^2 \phi_x^2 + \tan^2 \phi_y^2) \cos \phi_y^2}$$

여기서,  $\phi$ 와  $\theta$ 는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 구형 좌표계의 경도와 위도를 나타내는 값이며,  $\phi_x$ 와  $\phi_y$ 는 직교좌표계에서 X축과 Y축에 대한 회전각도를

뜻한다. 이들은 서로 다음과 같은 관계식을 통해 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \sqrt{\tan^2 \phi_x + \tan^2 \phi_y} \\ \theta &= -\arctan \left( \frac{\tan \phi_x}{\tan \phi_y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2 ER 양방향 클러치/브레이크

Fig. 1에 나타난 것과 같이 햅틱마스터 장치의 2 자유도 (X, Y) 회전운동메커니즘은 Fig. 3과 같은 ER 양방향 클러치/브레이크를 통해 구현이 된다. 클러치와 브레이크 같이 두 가지 작동 방식이 필요한 이유는 수술도구가 사람의 장기나 뼈와 접촉하게 되면 느낄 수 있는 반응동적인 반력과 심장이나 혈관과 같은 스스로 박동하는 장기와 접촉하게 되면 느낄 수 있는 능동적인 반력같이 최소침습수술에서 필요한 반력의 종류가 두 가지이기 때문이다. 따라서 이 연구에서는 브레이크 장치를 통하여 반응동적인 반력을 표현하고자 하며, 양방향 클러치 장치를 통하여 작지만 능동적인 힘을 구현하고자 한다.

ER 양방향 클러치/브레이크에서 발생하는 반력은 크게 세가지 성분으로 나눌 수 있다. 전기장에 따라 변화하는 ER 유체의 항복응력에 기인한 제어토크 ( $T_c$ )와 점성에 기인하는 점성토크 ( $T_\eta$ ), 그리고 양방향 회전시 디스크 축과 베어링 사이에서 발생하는 마찰등에 기인하는 마찰토크 ( $T_f$ )로 구성되며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

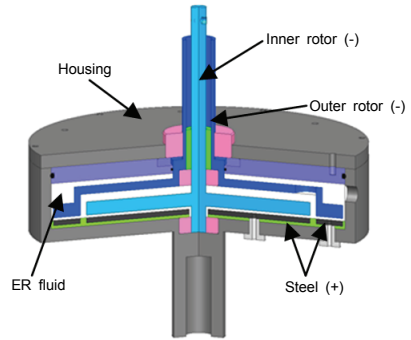
$$\begin{aligned} T &= T_c + T_\eta + T_f \\ &= \iint_s \tau_y(E) r dA + \iint_s \eta \dot{\gamma} r dA + c_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 항복응력이며,  $\eta$ 는 유체의 점성계수이며,  $\dot{\gamma}$ 는 전단비를 나타낸다. 또한  $c_c$ 는 컬롬 마찰에 의한 토크이며 실험적으로 결정한다. 이때, 식 (3)을 이용하여 ER 양방향 브레이크에서 발생하는 토크를 나타내면 다음과 같다.

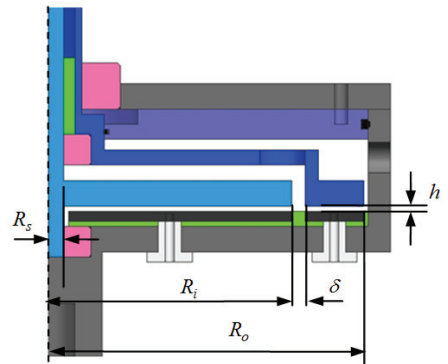
$$T = \frac{2\pi\tau_y}{3} (R_o^3 - R_s^3) + \frac{\pi\eta\omega}{2h} (R_o^4 - R_s^4) + T_f \quad (4)$$

여기서  $R_o$ 와  $R_s$ 는 각각 외측로터와 내측로터 축의 반지름이고,  $\dot{\theta}$ 와  $h$ 는 각각 로터의 회전속도와 전극사이의 간극을 의미한다.  $\delta$ 는 로터끼리의 ER 전단응력의 영향과 마찰을 최소화하기 위한 필요 거리이며, 이 거리는 크기가 매우 작아 토크모델링에서 무시되었다.

전기장을 어느 로터에 가하느냐에 따라 하우징의 회전 방향이 바뀌도록 고안된 ER 양방향 클러치는 위성기어시스템을 이용한다. 양방향으로 회전할 수 있게 고안된 위성기어시스템으로부터 내측 로터와 외측 로터가 서로 반대방향으로 회전한다. ER 유체는 내측 로터, 외측 로터, 하우징 사이에 존재하며, 내측 로터에 전기장을 가하면 하우징은 내측 로터와 같은 방향으로 회전한다. 반대로 외측 로터에 전기장을 가하면 하우징은 외측 로터와 같은 방향으로 회전한다. 전기장을 어느 로터에 가하느냐에 따라 하우징의 회전 방향이 바뀌도록 고안된 ER 양방향 클러치에서 발생하는 토크는 다음과 같다.



(a) Configuration of bi-directional ER clutch/brake



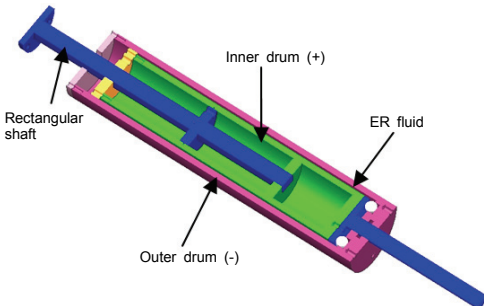
(b) Geometric parameters of ER clutch/brake

Fig. 3 Bi-directional ER clutch/brake

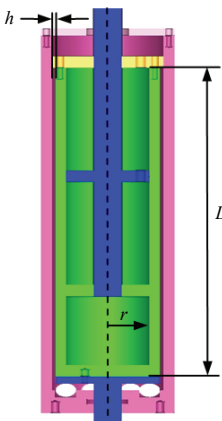
$$T = \frac{2}{3} \pi \tau_y (E) (R_i^3 - R_s^3) + \frac{1}{2h} \pi \eta (\omega - \dot{\theta}) (R_i^4 - R_s^4) + T_f \quad (5)$$

여기서  $R_i$ 는 내측로터의 반지름이고,  $\omega$ 는 구동 모터의 회전속도를 의미한다.

최소침습수술에서 발생하는 힘은 대부분은 반능동적인 반력이며, 단단한 장기와의 접촉을 구현하기 위해서는 10 N 정도의 힘을 표현할 수 있는 능력이 요구된다. 또한 심장이나 혈관의 맥박과 같은 능동적인 반력은 상대적으로 매우 작은 특징을 갖고 있다. 실제 시스템의 활용성을 극대화하기 위하여 목표 토크를 구현할 수 있는 범위 내에서 설계변수가 최소의 값을 가지도록 식 (4)와 식 (5)를 활용하여 최적설계를 수행하였으며, 이에 대한 자세한 사항은 참고문헌<sup>(10)</sup>에 나와 있다. 최종적으로 결정된 값은 Table 1에 나타내었다.



(a) Schematic configuration of ER brake



(b) geometric parameters of ER brake

Fig. 4 ER brake

### 2.3 ER 브레이크

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 햅틱마스터 장치의 1 자유도 (Z) 회전운동메커니즘을 구현하기 위해 짐발구조물의 손잡이에 위치한 Fig. 4와 같은 ER 브레이크 메커니즘을 고안하였다. 회전운동의 전달을 위하여 손잡이 부분은 사각형모형으로 제작하였다. z축 방향으로 손잡이를 회전시키게 되면 손잡이 케이스와 손잡이 사이에 채워진 ER 유체로 기인해 Z 축 회전방향으로 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$T = \int_0^L \left[ \tau_y + \frac{\eta r \dot{\theta}}{h} \right] \cdot 2\pi r^2 dL = 2\pi r^2 L \tau_y + \frac{4\pi r^3 L \eta \dot{\theta}}{h} \quad (6)$$

여기서  $L$ 는 내부 케이스의 길이이며,  $r$ 은 내부 케이스의 반지름을 나타낸다. 목표반력이 10 N이 되도록 식 (6)을 이용하여 설계변수를 구하였으며, 그 값은 Table 1에 나타내었다.

### 3. 제어기 설계

제안된 ER 햅틱 마스터는 단품성능실험을 통해 2차 시스템의 동적 거동을 하는 것을 확인하였으며 10 다음과 같이 2차 동적 모델로 표현할 수 있다.

$$\ddot{T}_c + 2\xi\omega_n\dot{T}_c + \omega_n^2 T_c = \omega_n^2 I \cdot u \quad (7)$$

여기서  $u$ 는 시스템입력이며,  $I$ 는 입력 전기장과 출력 토크간의 정적 관계를 나타내는 영향계수이다. 또한,  $\xi$ 와  $\omega_n$ 는 실험을 통해 구한 값이다. ER 유체는

Table 1 Design parameters of the ER haptic master

Components	Specification	Value
ER bi-directional clutch/brake	Inner radius( $R_i$ )	54 mm
	Outer radius( $R_o$ )	70 mm
	Shaft radius( $R_s$ )	3.5 mm
	Gap size( $h$ )	1 mm
ER brake on handle	Length of inner drum( $L$ )	135 mm
	Length of outer drum	168 mm
	Radius of inner drum( $r$ )	30 mm

널리 알려진 대로 히스테리시스 거동을 하며, 제안된 ER 햅틱 마스터는 기계적 마찰이 존재한다. 또한 영향계수 ( $I$ )는 불확실성을 가지는 다음과 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 + \delta I, \quad |\delta I| < a I_0 \quad (8)$$

여기서  $I_0$ 는 영향계수의 공칭값이며,  $\delta I$ 는 영향계수의 변동가능한 값이다.  $a$ 의 값은 0.3이라고 알려져 있다<sup>(6)</sup>.

따라서 불확실성과 외란에 강건한 슬라이딩 모드 제어기(sliding mode controller, SMC)<sup>(11,12)</sup>를 설계하여 제안된 햅틱 마스터에 적용하였다. 이를 위해 다음과 같이 슬라이딩 서피스를 정의하였다.

$$S = \dot{e} + ce = 0, \quad c > 0 \quad (9)$$

where  $e = T_{c,d} - T_c, \dot{e} = \dot{T}_{c,d} - \dot{T}_c$

여기서  $c$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기이며,  $T_{c,d}$ 는 제어가능한 토크의 목표값이다. 슬라이딩 모드가 존재하기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$S \cdot \dot{S} < 0 \quad (10)$$

이 조건을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 설계된다.

$$u = \frac{1}{\omega_n^2 I_0} \left\{ c\dot{e} + \ddot{T}_{c,d} + 2\xi\omega_n\dot{T}_c + \omega_n^2 T_c + k \operatorname{sgn}(S) \right\}$$

where

$$k > \left| \frac{\delta I}{I_0 + \delta I} \left\{ c\dot{e} + \ddot{T}_{c,d} + 2\xi\omega_n\dot{T}_c + \omega_n^2 T_c + d \right\} \right| \quad (11)$$

여기서  $k$ 는 불연속 계인을 나타낸다. 그러나 위와 같은 불연속 제어기는 채터링을 발생시키므로 정해진 경계조건 안에서 불연속 제어기를 근사화하기 위하여 부호함수,  $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 를 포화함수,  $\operatorname{sat}(\cdot)$ 로 대체하여 실험을 수행하였다.

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} s/\varepsilon & \text{for } \left| \frac{s}{\varepsilon} \right| \leq 1 \\ \operatorname{sgn}(s) & \text{for } \left| \frac{s}{\varepsilon} \right| > 1 \end{cases} \quad (12)$$

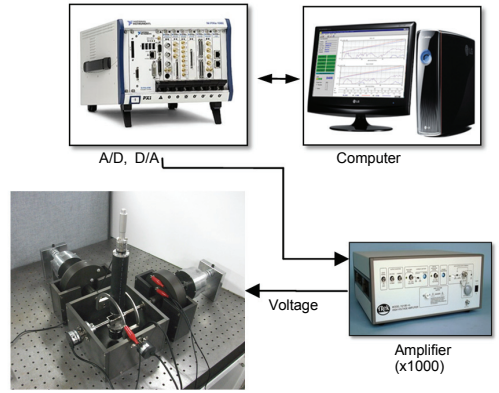


Fig. 5 Experiment apparatus of the haptic master

또한, 제어입력,  $u$ 는 다음과 같은 빙햄모델을 이용하여 전기장의 함수로 대체되어 햅틱 마스터에 인가된다.

$$u = \alpha |E|^\beta \operatorname{sgn}(E) \quad (13)$$

따라서 식(13)를 이용하면 다음과 같은 입력전기장을 얻을 수 있다.

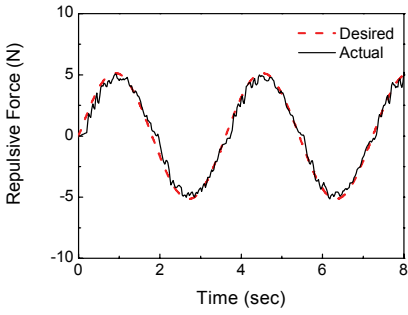
$$E_{x,y} = \left\{ \frac{3u}{2\pi\alpha\omega_n^2 I (R_{outer}^3 - R_{inner}^3)} \right\}^{\frac{1}{\beta}}$$

$$E_z = \left\{ \frac{u}{2\pi\alpha\omega_n^2 ILR_{inner\_drum}^2} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (14)$$

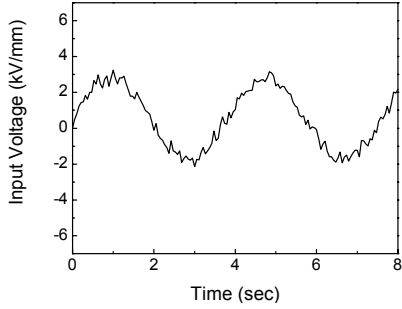
$E_{x,y}$ 는 ER 양방향 클리치/브레이크에 인가되는 전기장의 값이며,  $E_z$ 는 짐발구조물 손잡이에 위치하는 ER 브레이크에 인가되는 전기장의 값이다.

#### 4. 힘 반향 추적 제어성능평가

제안된 제어기법을 이용하여 햅틱 마스터 장치의 성능을 검증하기 위하여, 요구궤적에 대한 힘 반향 추적 제어시험을 수행하였다. Fig. 5는 힘 반향 추적 제어시험의 실험구성도를 나타낸 것이며, 사인파형태의 입력에 대한 추적제어성능을 실험을 통해 평가하였다. 그리고 이 연구에서 햅틱 마스터 시스템의 힘 반력 제어시험에 사용된 로드셀은 6축 센서로 손잡이(gripper)의 중간 부분에 위치하여 반력을

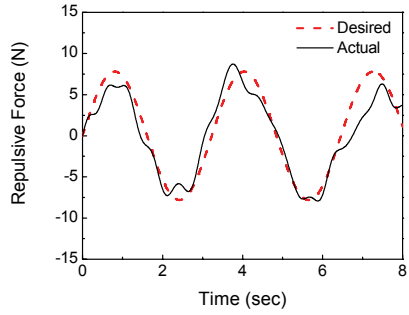


(a) Tracking result

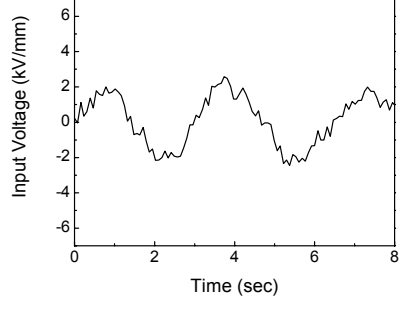


(b) Control input

**Fig. 6** Force tracking control response in ER bi-directional clutch

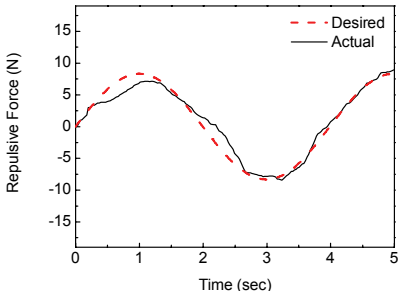


(a) Tracking result

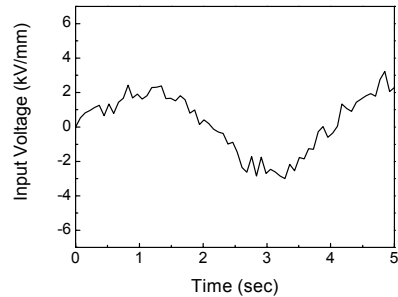


(b) Control input

**Fig. 8** Force tracking control response in ER brake



(a) Tracking result



(b) Control input

**Fig. 7** Force tracking control response in ER bi-directional brake

측정하였다. 그리고 측정되어진 디지털 신호는 제어기에 입력되어 제어입력이 계산되어 햅틱 마스터 시스템에 제어입력이 인가되도록 하였다. Fig. 6부터 Fig. 8까지 제안된 햅틱 마스터의 힘 반향 추적실험 결과를 나타낸 것으로 앞서 제안된 슬라이딩 모드 제어기를 통해 제어 성능을 평가하였다. Fig. 6은 ER 양방향 클러치/브레이크의 클러치모드일 때 제어 결과이며, Fig. 7은 브레이크 모드일때 제어 결과이다. 또한 Fig. 8은 손잡이부분에 위치한 ER 브레이크의 제어 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 요구 궤적을 비교적 잘 추적하고 있음을 알 수 있다. 한편 ER 브레이크의 제어 성능이 ER 양방향 브레이크 보다 비교적 추적제어성능이 우수하지 않은 것을 확인할 수가 있는데, 이는 *rectangular shaft*의 기하학적 형상으로 인한 내외 측 드럼간의 비교적 높은 마찰로 인한 영향으로 파악된다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 ER 유체를 이용하는 새로운 형태의 의료용 햅틱 마스터를 제안하였다. 제안된 햅틱

마스터 장치는 ER 양방향 클러치/브레이크, 짐발 구조물과 손잡이에 위치한 ER 브레이크로 구성된다. ER 유체의 빙햄모델을 고려하여 햅틱 마스터 장치의 주요 설계변수를 결정한 후 이를 바탕으로 장치를 제작하였다. ER 유체의 히스테리시스 거동을 보상하기 위해 외란에 강건한 슬라이딩 모드 제어를 통해 제안된 ER 햅틱 마스터의 우수한 힘 반향 추적 제어성능을 실험적으로 입증할 수 있었다. 향후 햅틱 마스터와 슬레이브 로봇을 연계하여 수술용 로봇에 적용 가능성을 연구할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0015090)

## 참 고 문 헌

- (1) Intuitive Surgical, [www.intuitivesurgical.com](http://www.intuitivesurgical.com).
- (2) Guthart, G. S. and Jr. Salisbury, J. K., 2000, The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 618~621.
- (3) Pierrot, F., Dombre, E., D'egoulange, E., Urbain, L., Caron, P., Sylvie, B., Gari'epy, J. and M'egnien, J., 1999, A Safe Robot Arm for Medical Applications with Force Feedback, Medical Image Analysis, Vol. 3, pp. 285~300.
- (4) Yamaguchi, Y., Furusho, J., Kimura, S. and Koyanagi, K., 2004, High-performance 2D Force Display System Using MR Actuators, Proc. 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, pp. 2911~2917.
- (5) Kang, P. S., Han, Y. M. and Choi, S. B., 2006, Force-feedback Control of an Electro-rheological Haptic Device in MIS Virtual Environment, Transaction of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 1286~1293.
- (6) Han, Y. M. and Choi, S. B., 2008, Control of an ER Haptic Master in a Virtual Slave Environment for Minimally Invasive Surgery Applications, Smart Materials & Structures, Vol. 17, No. 6, p. 065012.
- (7) Senkal, D. and Gorocak, H., 2009, Spherical Brake with MR Fluid as Multi Degree of Freedom Actuators for Haptics, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 20, No. 18, pp. 2149~2160.
- (8) Boku, K. and Nakamura, T., 2009, Development of 3-DOF Soft Manipulator with ER Fluid Clutches, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 21, No. 15, pp. 1563~1567.
- (9) Li, W. H., Liu, B., Kosasih, P. B. and Zhang, X. Z., 2007, A 2-DOF MR Actuator Joystick for Virtual Reality Applications, Sensors and Actuators, Vol. 137, No. 2, pp. 308~320.
- (10) Lim, S. G., Nguyen, P. B. and Choi, S. B., 2011, Design and Experimental Test of ER Fluid Based 3-DOF Haptic Master System for MIS, ICADME 2011, Guangzhou, China, pp. 600~603.
- (11) Edwards, C. and Spurgeon, S., 1998, Sliding Mode Control, Taylor & Francis, London, UK, Chaps. 3,4.
- (12) Utkin, V., Guldner, J. and Shi, J., 1999, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, CRC Press, London, UK, Chaps. 6.