

# 전기유변 유체를 이용한 햅틱 마스터와 가상의 최소침습수술 환경과의 연동제어

## Force-feedback Control of an Electrorheological Haptic Device in MIS Virtual Environment

강 필 순\* · 한 영 민\*\* · 최 승 북†

Pil-Soon Kang, Young-Min Han and Seung-Bok Choi

(2006년 10월 10일 접수 ; 2006년 11월 8일 심사완료)

**Key Words** : Haptic Device(햅틱장치), Haptic Rendering(햅틱 렌더링), Electrorheological Fluid(전기유변 유체), Shape Retaining Chain Linked Model(S-chain 모델), Sliding Mode Controller(슬라이딩 모드 컨트롤러)

### ABSTRACT

This paper presents force-feedback control performance of a haptic device in virtual environment of minimally invasive surgery (MIS). As a first step, based on an electrorheological (ER) fluid and spherical geometry, a new type of master device is developed and integrated with a virtual environment of MIS such as a surgical tool and human organ. The virtual object is then mathematically formulated by adopting the shape retaining chain linked (S-chain) model. After evaluating reflection force, computational time, and compatibility with real time control, the virtual environment of MIS is formulated by interactivity with the ER haptic device in real space. Tracking control performances for virtual force trajectory are presented in time domain.

### 1. 서 론

최근 로봇이 적극적으로 활용되고 있는 의료 분야에서의 햅틱 구현은 매우 시급한 과제라 할 수 있다. 현대의 수술은 첨단 수술 도구와 로봇을 이용하여 집도되는 추세이며, 최소침습수술(minimally invasive surgery, MIS)이 그 대표적인 예이다<sup>(1,2)</sup>. 이 수술법은 환부의 구멍에 수술도구와 카메라를 삽입하여 집도의가 모니터를 보면서 시술하는 것으로, 환자의 내부에서 손의 움직임과 시야의 제약을 받게 된다. 따라서 첨단의 의료용 로봇 시스템이 개발되

어 왔으며, 대표적으로 Computer Motion사의 ZEUS 시스템과 Intuitive Surgical사의 Da Vinci 시스템 등이 있다. 하지만, 시스템이 매우 복잡하고 고가인데다, 환자의 장기나 뼈를 만지고 상태를 확인할 수 없는 문제점을 여전히 안고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 최근 다양한 의료용 햅틱 장치들이 연구 개발되고 있으며<sup>(3-5)</sup>, 주로 마스터 로봇에서 햅틱 장치를 이용한 근 감각적인 힘을 구현하는데 초점을 두고 있다. 하지만 대부분의 시스템이 전기서보모터를 사용함에 따라 구조가 복잡하고 기구학적 해석이 난해함을 갖고 있다. 따라서 최근 지능형 작동기를 도입한 연구들이 활발히 수행되고 있다.

특히, 지능유체인 ER(electrorheological) 유체는 전기장의 세기에 의해 전단저항력이 조절되는 특성을 갖는 재료이다. 또한, 원구형 로봇 관절 장치는 매우

† 책임저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716

\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 인하대학교 기계공학과

단순한 구조로 3자유도 회전운동이 가능하다. 따라서, 이의 조합을 이용한 햅틱 장치는 전기장의 크기만으로 토크를 변화시킴으로써 3자유도 힘 반향을 연속적이며 효과적으로 제어할 수 있는 장점을 갖는다.

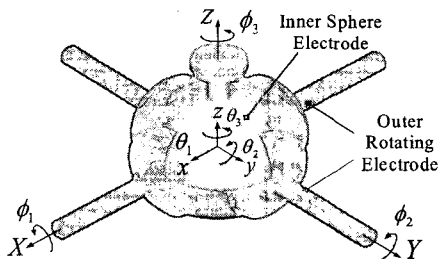
따라서, 이 연구에서는 ER 유체를 이용한 햅틱 마스터 장치를 구축하고, 실제 인체조직을 고려한 가상의 햅틱 모델(haptic model)을 사용하여 햅틱 마스터 장치의 능동모드에서의 보다 사실적인 힘 반향 제어 성능을 평가하였다.

## 2. ER 햅틱 마스터

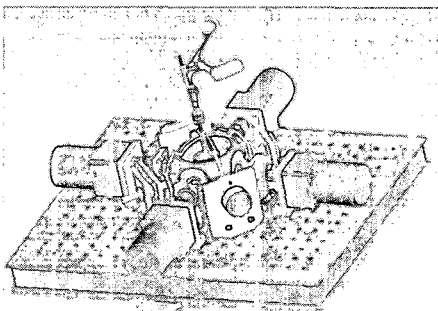
### 2.1 ER 햅틱 마스터의 설계

제안된 원구형 ER 햅틱 마스터 장치는 Fig. 1(a)와 같이 3축 회전운동이 가능한 원구형 조인트로서, Fig. 1(b)와 같이 네개의 AC 모터에 고정되어 회전이 가능한 외측구 내에 자유로이 운동할 수 있는 내측구가 있고, 내외측구 사이에는 ER 유체가 채워져 있다. 도입된 원구형 내측 회전자는 3자유도 회전운동이 가능하므로 전기장 인가 시 3자유도의 반력을 생성시킬 수 있다.

원구형 ER 햅틱 마스터 장치는 간극사이의 쿨롬



(a) Schematic diagram



(b) ER haptic master

Fig. 1 Geometric feature of the spherical master

(Coulomb) 마찰력( $T_f$ )을 무시하면 전기장에 따라 변화하는 ER 유체의 항복응력에 기인한 성분( $T_c$ )과 유체의 점성에 기인하는 점성 마찰력( $T_\eta$ )으로 구성되며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_f = T_c + T_\eta \quad (1)$$

ER 햅틱 마스터 장치의 형상이 원구형이므로 토크를 모델링하기 위하여 Fig. 2와 같은 구면좌표계를 도입하였다. 먼저 ER 유체의 점성에 기인하는 점성 마찰력( $T_\eta$ )은 유체의 기본점성  $\eta$ 와 전단비  $\gamma$ 로부터 다음과 같이 표현된다.

$$T_\eta = \iint_S \eta \gamma r_c dA \quad (2)$$

또한, 구면상의 미소면적  $dA$ 에 대해 ER 유체의 항복전단응력을 고려하면  $T_c$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_c = \iint_S \tau_y r_c dA \quad (3)$$

여기서,  $\tau_y$ 는 항복전단응력이며 전압에 비례하는 전기장  $E$ 의 함수이다. 그리고 토크를 발생시키는 축의 회전반경  $r_c = r_e \cos v$ 이며, 이때  $r_e$ 는 전극의 반경이다. 전극의 형상을 고려하면 식 (1)의 각 성분들은 회전방향에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T_c &= \iint_S (\tau_{y,cw} - \tau_{y,ccw}) r_e \cos v dA \\ &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} (\tau_{y,cw} - \tau_{y,ccw}) r_e^3 \cos^2 v \, du dv \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_\eta &= \iint_S \eta \frac{r_c(\omega - \dot{\theta})}{h} r_e \cos v dA \\ &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \eta \frac{(\omega - \dot{\theta})}{h} r_e^4 \cos^3 v \, du dv \end{aligned}$$

여기서,  $\tau_{y,cw}$ 와  $\tau_{y,ccw}$ 는 전기장  $E$ 에 의해 발생하는 정/역 방향의 항복 전단응력이고,  $h$ 는 전극의 간극이며,  $\omega$ 와  $\dot{\theta}$ 는 모터의 회전 속도와 내측구의 회전 속도이다. 또한  $v_0$ 은 외측 원구의 높이를 나타내는 각도이다.

내측구의 회전속도를 0이라 가정하면 식 (1), (4)로부터 ER 햅틱마스터 장치에서 발생되는 전체 토

크는 다음과 같다.

$$T_t = 6314.6r_e^3 \{2v_0 - \sin(\pi - 2v_0)\} + \frac{0.4163}{h} r_e^4 \left\{ 8 - 9\sin\left(\frac{\pi}{2} - v_0\right) - \sin\left(\frac{3}{2}\pi - 3v_0\right) \right\} \quad (5)$$

여기서, 사용된 ER 유체의 점성계수는 0.53 Pas이며, AC모터의 회전속도는 1.5 rad/s이다. 식에 나타난 바와 같이 ER 조인트는 전극의 유효반경  $r_e$ , 외측 원구의

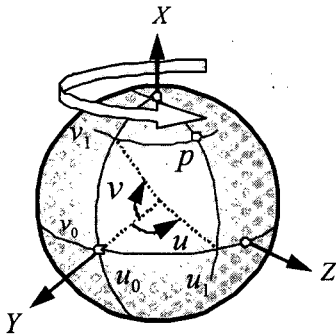
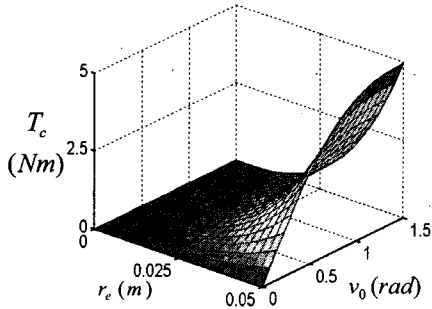
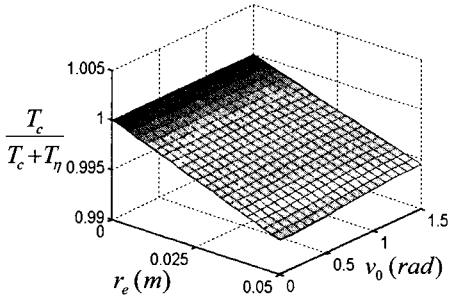


Fig. 2 Spherical coordinate system



(a)



(b)

Fig. 3 Effect of design parameters of the ER joint

높이를 나타내는 각도  $v_0$ , 전극 간극  $h$  등의 설계변수를 갖는다. 이 연구에서는 전극 간극  $h$  를 1mm로 가정한 상태에서 Fig. 3과 같이 설계 변수인  $r_e$  와  $v_0$  의 값을 변화시켜 가면서  $T_c$  와  $T_c / (T_c + T_n)$  의 변화를 고찰하였다. Fig. 3(a)과 같이 제어 토크인  $T_c$  는 외측 전극의 각도  $v_0$  가 약 0.8 rad일 때까지 증가량이 급증하다가 그 이후 증가량이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3(b)와 같이 내측 전극의 반지름  $r_e$  이 증가함에 따라 제어 토크  $T_c$  가 현저히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 우선적으로 성능의 극대화와 작업영역을 고려하여 외측 전극의 각도  $v_0$  를 설정하였으며, 이 연구에서 목표로 한 토크량을 만족하는 내측 전극의 반지름  $r_e$  를 설정하였다. 이 연구에서 목표로 한 능동모드에서는 최대 토크량은 0.076 Nm이다. 그 결과 ER 조인트의 설계 변수  $v_0$  와  $r_e$  는 각각 0.72 rad과 3 cm로 설정하였다. 도출된 설계 값들에 따라 ER 조인트를 실제 제작하였으며, 이를 이용하여 마스터 시스템을 구축하였다. Fig. 1(b)는 제작된 ER 마스터의 전체 구성도이다.

## 2.2 ER 햅틱 마스터의 기구학 해석

제안된 ER 햅틱 마스터 장치는 Fig. 4와 같이 피봇점 O를 기준으로 3자유도 회전을 하고 있다. 따라서 ER 햅틱 마스터 장치의 손잡이 부분이 피봇점을 기준으로 임의의 점 P로 회전하였을 경우 절대좌표에 대한 손잡이의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= r_e(\sin\theta_2) \\ y_1 &= r_e(\sin\theta_1) \\ z_1 &= r_e\sqrt{1 - (\sin^2\theta_1 + \sin^2\theta_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

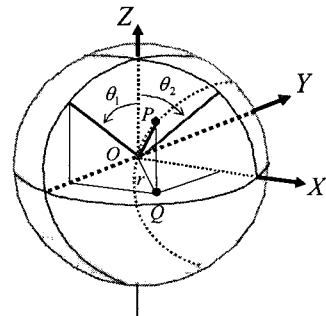


Fig. 4 Coordinates of the ER Haptic Master

여기서,  $re$ 는 손잡이의 길이  $OP$ 이다.

ER 햅틱장치는 3개의 엔코더를 사용하여 3자유도 회전량을 측정하였다. 2 개의 엔코더는 X축과 Y축의 회전량을 측정하며 1개의 엔코더는 중공형 타입의 엔코더로써 손잡이의 z축 방향의 회전량을 측정한다. X축과 Y축의 회전량을 측정하는 엔코더는 절대좌표 Z축으로부터 45도 회전되어 있다.

따라서  $x_1, y_1, z_1$ 은 엔코더의 위치를 기준으로 한 상대위치가 된다. 상대위치와 절대위치 사이에는 절대좌표 Z축을 기준으로 45도 회전관계이므로 다음과 같이 손잡이의 절대위치  $P(x_2, y_2, z_2)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = Rot(Z, 45^\circ)^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= \cos(\varphi)x_1 + \sin(\varphi)y_1 \\ y_2 &= -\sin(\varphi)x_1 + \cos(\varphi)y_1 \\ z_2 &= z_1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $\varphi$ 는 엔코더가 절대좌표 Z축으로부터 회전된 45도의 각도이다.

### 3. 가상환경 모델링

#### 3.1 S-chain model 을 이용한 가상물체 모델링

햅틱 모델(haptic model)이란 사람이 가상의 물체와 상호작용하여 물체가 변형되었을 때, 변형에 따른 힘을 얻을 수 있는 모델을 의미한다. 변형 가능한 가상의 물체를 조작하기 위하여 많은 모델들이 제안되었으나, 이러한 모델들은 많은 계산량으로 인하여 대부분 표면 햅틱렌더링(surface haptic rendering)에만 국한되고 있는 실정이다. 그러나 이 연구에서는 보다 사실적이고 빠른 볼륨 렌더링을 위하여 S-chain model<sup>(6,7)</sup>을 사용하여 가상 물체를 모델링 하였다.

볼륨데이터를 가진 가상의 물체를 실시간으로 처리하기 위하여 Gibson<sup>(8,9)</sup>은 3D ChainMail 알고리즘을 제안하였고, 이 알고리즘의 단점을 보완하고 보다 햅틱 렌더링에 적합하게 설계한 것이 S-chain model이다. S-chain model을 이용하여 변형을 계산할 때 물체에서 변형은 전체적으로 발생하는 것이 아

니고 국부적으로 발생하기 때문에, S-chain model은 매우 많은 볼륨 요소로 이루어진 물체의 실시간 변형 계산에 적합하다.

S-chain model의 기본가정은 ‘물체의 변형을 먼저 계산 한 후, 힘을 구한다’는 것이다. 이러한 가정 하에, 사용자에게 전달되어지는 힘을 S-chain model을 이용하여 계산한다. S-chain model은 가상의 물체를 작은 요소들로 나누고 이 작은 요소들을 각각 모두 체인들로 모델링한다. S-chain model의 기본 개념은 ‘사용자에게 전달되어지는 힘은 움직이는 체인의 개수에 비례한다’는 것이다. Fig. 5는 S-chain model의 기본 개념을 설명하고 있다. 만일 사용자가 가상의 물체를 움직여서 첫 번째 체인요소( $e_1$ )가  $dX_{max}$ 보다 작게 움직이면 첫 번째 스프링이 작동하여 사용자에게 전달되어지는 힘은  $F = k_1 dX_1$ 가 된다. 그리고 첫 번째 체인요소( $e_1$ )가 최대로 늘어나게 되면 두 번째 체인요소( $e_2$ )가 움직이고 첫 번째 요소( $e_1$ )에 연결된 스프링은 최대로 늘어난 상태를

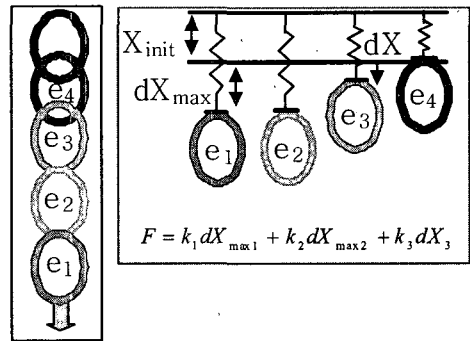


Fig. 5 Basic concept of S-chain model

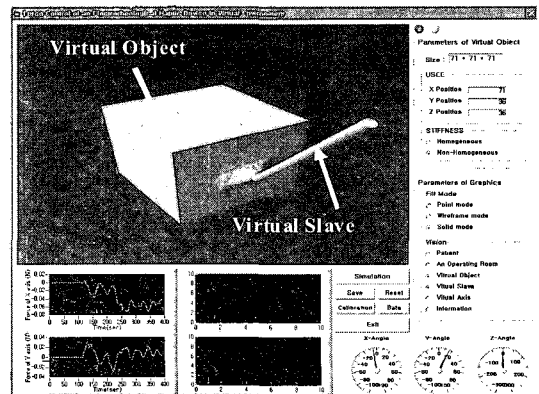


Fig. 6 Program of virtual environment

유지하면서 두 번째 체인요소( $e_2$ )에 연결된 스프링이 동작하여 힘( $F$ )은  $F = k_1 dX_{\max} + k_2 dX_2$ 가 된다. 이와 같은 방법으로 세 번째 체인요소( $e_3$ )가 움직이게 되면 힘( $F$ )은  $F = k_1 dX_{\max} + k_2 dX_{\max} + k_3 dX_3$ 이 되는 것이다. 이러한 S-chain model을 이용한 가상물체의 변형된 전체 변위량과 반력을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta X = \sum_{i=1}^{n-1} (dX \max_i) + dX_n$$

$$F = \left( \sum_{i=1}^{n-1} k_i dX \max_i \right) + K_n dX_n$$
(9)

2차원이나 3차원 공간에서 S-chain model은 각각의 x, y, z요소들이 decouple 되어있기 때문에 복잡한 계산 없이도 1차원 모델처럼 전체 변위량과 반력을 계산할 수 있다.

### 3.2 가상 환경 모델링

이 연구에서는 Fig. 6와 같이 S-chain model을 이용하여  $(71 \times 71 \times 71)$  사이즈의 정육면체 모양의 가상물체를 모델링하였으며, 최소침습수술을 고려하여 ER 햅틱 마스터 장치의 피봇점을 기준으로 점대칭 구조를 갖는 가상 슬레이브를 설계하였다.

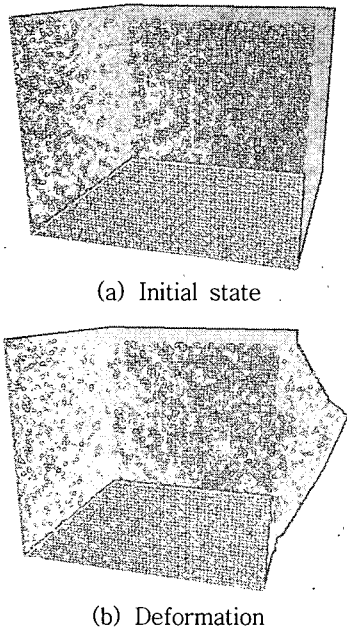


Fig. 7 Deformation of virtual object  $(71 \times 71 \times 71)$

따라서 사용자에게 의하여 ER 햅틱 마스터 장치가 조작이 되면 화면상의 슬레이브가 움직이게 되고 가상 슬레이브와 가상 물체 사이에 충돌이 발생하며 이때 가상 물체는 S-chain model 알고리즘에 의하여 변형(deformation)과 반력(reflection force)을 만들게 되는 것이다. Fig. 7은 가상 물체의 변형 전/후를

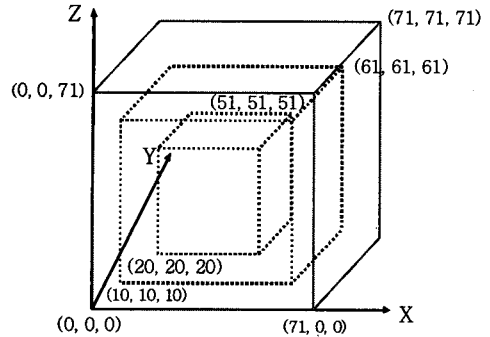


Fig. 8 The non-homogeneous object

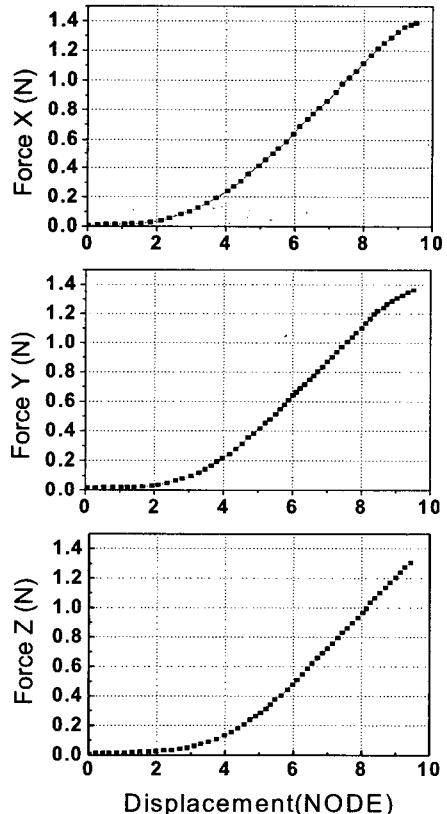


Fig. 9 Reflection force components from the 3D haptic model of size  $(71 \times 71 \times 71)$ , non-homogeneous)

시험한 결과 이며 3D-ChainMail 알고리즘과는 달리 S-chain model을 사용할 경우 변형 후 초기상태로 가지 않고 에너지를 내부에 가지고 있어 햅틱 렌더링에 사용할 수 없는 문제점이 발생하지 않았다. 또한 가상 물체의 변형을 80 Hz 이상으로 그래픽처리를 하는 것을 알 수가 있었다. 사실적인 인체 조직은 물성치가 일정하지 않은 non-homogeneous 속성을 지니고 있다. Fig. 8은 이 연구에서 사용한 가상 물체의 non-homogeneous 모델의 구성을 보여주고 있으며, 가상물체를 3등분하여 스프링 상수값을 각각 달리하여 실험에 적용하였다. Fig. 9는 가상의 물체를 천천히 변형시키면서 가상물체의 각 축방향에서 발생하는 반력을 측정한 그래프이다. 이는 실제 생체조직에서 발생하는 힘과 매우 유사함을 알 수가 있다.

#### 4. 힘반향 제어 알고리즘 및 시뮬레이션

제안된 ER 햅틱 마스터 장치는 실험을 통해 2차의 동적 거동을 하는 것을 확인하였으며 다음과 같이 2차 동적 모델로 표현할 수 있다.

$$\ddot{F}_i + 2\zeta\omega_n\dot{F}_i + \omega_n^2 F_i = \omega_n^2 I_i \cdot u_{\theta_i}, \quad i=1,2 \quad (10)$$

여기서,  $u_{\theta}$ 는 일반화 힘이며,  $I$ 는 입력 전기장과 출력토크간의 정적 관계를 나타내는 영향계수이다. 또한  $\zeta$ 와  $\omega_n$ 는 실험으로부터 구한 값이다. 그러나, 제어 입력 반향과 일반화 힘의 반향이 서로 다르다. Fig. 1(a), (b)에 표시된 바와 같이 클러치 액추에이터는 고정좌표계 XYZ에 고정되어 있으며, 내측구는 상대좌표계 xyz에 고정되어 회전하는 것을 알 수 있다. 따라서 고정좌표계와 회전좌표계 회전운동 사이에 다음과 같은 오일러 각의 관계를 정의하였다.

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ 는 고정좌표 XYZ에 대한 회전방향이며, 동시에 클러치에 의해 토크가 발생하는 방향이다.

식 (11)에 가상일정리(virtual work principle)를 적용하면 다음과 같이 조인트에서 입력과 일반화 힘 사이의 관계를 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_{\theta 1} \\ u_{\theta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\phi 1} \\ u_{\phi 2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, Z축 방향은 고려되지 않았다. 식 (10), (12)로부터 다음과 같은 능동 조인트 시스템의 동적 지배방정식을 도출 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{F}_1 + 2\zeta\omega_n\dot{F}_1 + \omega_n^2 F_1 \\ \ddot{F}_2 + 2\zeta\omega_n\dot{F}_2 + \omega_n^2 F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_n^2 I_1 \cdot u_{\theta 1} \\ \omega_n^2 I_2 \cdot u_{\theta 2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ER 햅틱 마스터 장치는 히스테리시스 거동을 하며, 내측구의 회전시 기계적 마찰이 존재한다. 또한 영향계수(I)와 같은 불확실성이 존재한다. 따라서 불확실성과 외란 등에 강건한 슬라이딩 모드제어기(sliding mode controller)<sup>(10)</sup>를 사용하였으며, 식 (13)과 같이 2개의 입력을 고려하여 다음과 같은 슬라이딩 서피스를 정의하였다.

$$\begin{aligned} S_1 &= \dot{e}_1 + c_1 e_1 = 0, & c_1 &> 0 \\ S_2 &= \dot{e}_2 + c_2 e_2 = 0, & c_2 &> 0 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $c_1, c_2$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기이며,  $e_1, e_2$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_1 &= F_{1d} - F_1, & \dot{e}_1 &= \dot{F}_{1d} - \dot{F}_1 \\ e_2 &= F_{2d} - F_2, & \dot{e}_2 &= \dot{F}_{2d} - \dot{F}_2 \end{aligned} \quad (15)$$

식 (14)와 같은 슬라이딩 서피스에서 슬라이딩 모드가 존재하기 위해서는 다음과 같은 슬라이딩 조건을 만족해야 한다.

$$S_i \cdot \dot{S}_i < 0, \quad i=1,2 \quad (16)$$

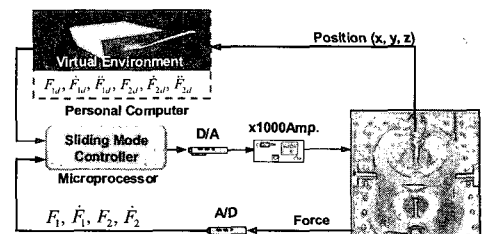


Fig. 10 The configuration of the force-feedback control

식 (16)을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 표현이 된다.

$$u_{\theta_1} = \frac{1}{\omega_n^2 I_0} \times \{c_1 \dot{e}_1 + \ddot{F}_{1d} + 2\zeta\omega_n \dot{F}_1 + \omega_n^2 F_1 + k_1 \operatorname{sgn}(S_1)\}$$

$$u_{\theta_2} = \frac{1}{\omega_n^2 I_0} \times \{c_2 \dot{e}_2 + \ddot{F}_{2d} + 2\zeta\omega_n \dot{F}_2 + \omega_n^2 F_2 + k_2 \operatorname{sgn}(S_2)\}$$

(17)

여기서,  $k_1, k_2$ 는 불연속 계인을 나타낸다. 이러한 불연속 제어기는 체터링을 발생시키므로 정해진 경계조건 영역 안에서 불연속 제어를 연속 제어기로 근사화하여 식 (18)과 같은 포화함수로 대체하였다.

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} s/\varepsilon & \text{for } |s/\varepsilon| \leq 1 \\ \operatorname{sgn}(s) & \text{for } |s/\varepsilon| > 1 \end{cases} \quad (18)$$

실제 제어 입력 신호는 고정 좌표계에서 입력되므로 고정좌표계에서의 입력은 다음과 같다.

$$u_\varphi = \alpha(E)^\beta \quad (19)$$

여기서,  $\alpha, \beta$ 는 ER 유체의 특성값이며,  $E$ 는 전기장([kV/mm])을 나타낸다. 따라서 식 (12)와 같이 고정좌표계와 상대 좌표계의 관계를 고려하면 다음과 같은 고정좌표계에서의 입력 전기장을 얻을 수 있다.

$$E_1 = \frac{1}{\alpha \cos \theta_2} [u_{\theta_1} \cos \theta_3 - u_{\theta_2} \cos \theta_2 \sin \theta_3]^\frac{1}{\beta}$$

$$E_2 = \frac{1}{\alpha \cos \theta_2} [u_{\theta_1} \sin \theta_3 - u_{\theta_2} \cos \theta_2 \cos \theta_3]^\frac{1}{\beta}$$

(20)

Fig. 10은 힘 방향 제어를 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 사용자가 ER 햅틱 마스터 장치를 조작하면 가상 슬레이브가 움직이게 되며 가상 슬레이브와 가상 물체사이 충돌이 발생한다. 충돌시 가상물체는 변형을 발생시키며 반력을 생성하게 된다. 이렇게 만들어진 반력으로부터 슬라이딩 모드 제어기는 제어입력 신호를 만들고 이 제어입력 신호는 ER 햅틱 마스터 장치를 제어하게 된다. Fig. 11은 ER 햅틱 마스터 장치의 동적 지배방정식과 가상 물체에서 생성된 반력에 대한 힘 방향 추적 제어 시뮬레이션을 수행한 결과를 도시한 것이다. 결과에서 보는 바와 같이  $\theta_1, \theta_2$ 의 회전 방향에 대해 요구궤적을 잘 추적하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 제안된 ER 햅틱 마스터 장치가 우수한 힘 방향 제어 성능을 발휘할 수 있음을 확인 할 수 있다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 의료용 로봇 시스템을 위한 새로운 햅틱 인터페이스로서 ER 햅틱 마스터 장치를 설계 및 제작하고, 가상환경을 구축하여 ER 햅틱 마스터 장치의 성능을 고찰하였다. 먼저, 새로운 메커니즘의 원구형 ER 햅틱 장치를 고안함으로써 매우 단순한 구조로 3 자유도 회전 운동을 실현하였다. 또한, 실

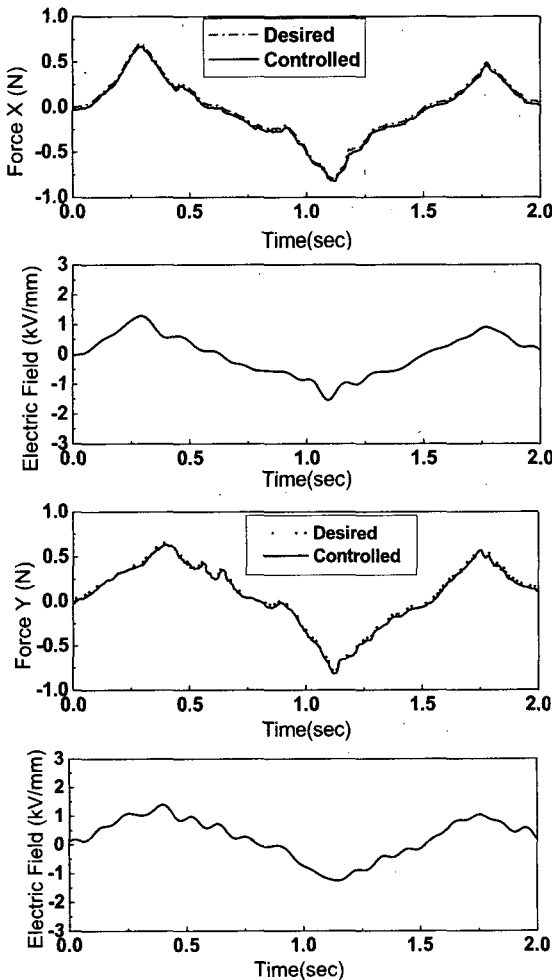


Fig. 11 Force tracking control responses

제적인 의료용 햅틱 장치를 위해 인체조직을 고려한 가상 환경을 만들어 ER 햅틱 마스터 장치의 제어모델에 대한 추적제어 성능을 시뮬레이션을 통해 고찰함으로써 제안된 3 DOF ER 햅틱 마스터 장치의 우수한 힘 방향 제어성능을 입증하였다. 향후 실제 마스터와 가상 환경간의 연동제어를 실시할 계획이다. 또한 실제 슬레이브를 제작하여 보다 현실적인 실험을 통해 제안된 ER 햅틱 마스터 장치의 힘 방향 제어를 실험적으로 고찰 할 예정이다.

## 후 기

이 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업 (과제번호: KRF-2004-041-D00050)의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Abovitz, R., 2001, "Digital Surgery: the Future of Medicine and Human-robot Symbiotic Interaction", *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 28 No. 5, pp. 401~405.
- (2) Rovers, A. F., 2002, "Haptic Feedback: A Literature Study on the Present-day Use of Haptic Feedback in Medical Robotics", DCT Report nr., University of Technology.
- (3) Han, Y. M., 2005, "Design and Control Haptic Interface Utilizing Smart Materials", Ph.D. Dissertation, Inha University.
- (4) Han, Y. M. and Choi, S. B., 2006, "Force-feedback Control of a Spherical Haptic Device Featuring an Electrorheological Fluid", *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 5, pp. 1438~1446.
- (5) Lee, S. S. and Lee, J. M., 2003, "Design of a General Purpose 6-DOF Haptic Interface", *Mechatronics*, Vol. 13, pp. 697~722.
- (6) Park, J., Kim, S. Y., Son, S. W. and Kwon, D. S., 2002, "Shape Retaining Chain Linked Model for Real-time Volume Haptic Rendering", *IEEE/SIGGRAPH Symposium on Volume Visualization and Graphics*, Boston, pp. 65~72.
- (7) Kim, S. Y., Park, J., Son, S. W. and Kwon, D. S., 2002, "Real-time Soft Material Volume Deformation Using Shape Retaining Chain Linked Model", *International Conference on Virtual Systems and MultiMedia(VSMM)*, Gyeongju, Korea, pp. 256~263.
- (8) Gibson, S., 1997, "3D ChainMail: A Fast Algorithm for Deforming Volumetric Objects", *Symposium on interactive 3D Graphics*, pp. 149~154.
- (9) Frisken-Gibson, S. F., 1999, "Using Linked Volumes to Model Object Collisions, Deformation, Cutting, Carving, and Joining", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5, No. 4, pp. 333~348.
- (10) Sung, K.-G., Cho, J.-W. and Choi, S.-B., 2006, "Vibration Control of Quarter ER Suspension System Using Fuzzy Moving Sliding Mode Controller", *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, KSNVE06S-25-087.