

## ER유체를 이용한 수술용 원격 제어 시스템의 힘 반사 제어부에 관한 연구

신진오\*(부산대원), 이은준(부산대원), 박명관(부산대)

### A Study on Force Reflection Controller of Tele-Surgery Control System using ERF

J. O. Shin\* , E. J. Rhee , M. K. Park

#### ABSTRACT

The development of a robot system being able to work instead of human in the hazardous environment have been conducted for many year. In this study, the new design of controllers for the Master-Slave system is discussed. The Master-Slave system, force, velocity and torque signals are communicated between a master and a slave system. The conventional requires the enhancement of characteristics of tactility for minute force, precision signals and mechanical abrasion of loader. It is possible by controlling the viscosity of ERF(Electro-rheological fluid) since it varies with the electric field. Design of controller as well comparison between numerical simulation and experiments as will be presented. Futhermore, current methodology is also applicable to design of tele-surgery

**Key Words** : Master-Slave System(마스터 슬레이브 시스템), Tele-Surgery(원격수술), Tele-operation(텔레오퍼레이션), Electro-Rheological Fluid(ERF : 전기 점성 유체)

#### 1. 서론

원격의 힘 반사 이론에 근거를 둔 원격 조정 매니퓰레이터(Manipulator)는 R. Geortz에 의해 개발된 1960년 이후 많은 분야에서 연구되어 지고 응용되어 지고 있다.<sup>[1]</sup> 원격 제어 시스템이란 완전히 사람의 의도에 따라 동작하는 시스템을 의미한다. 여기서 원격은 인간의 감각이나 작업능력이 미치지 못함을 의미하고, 제어는 인간에 의한 계속적 구축을 의미한다.<sup>[2]</sup> 원격시스템은 작업자가 구동하는 마스터 시스템(Master system)과 원하는 작업을 수행하는 슬레이브 시스템(Slave system)이 있다. 이러한 원격제어에서 중요시되는 것은 영상 정보(Visualization information)와 근 감각적인 정보(Kinesthetic information)이다.<sup>[3]</sup> 영상정보의 발달은 직접 작업자의 눈에 보여지는 곳에서의 작업 수행에서 카메라를 이용한 실시간 모니터링에 의해 작업을 수행하는 단계까지 이르렀다. 하지만 최근에는 근 감각적인 정보에 대한 중요성이 대두되면서 정확하고 정밀한 신호에 대한 처리가 필요하다. 또한, 그 신호

에 대한 촉감인식에 대한 연구가 수행되고 있다.

미래 산업의 한 분야인 의료산업에서 기계장치의 도입이 활발해지고 있다.<sup>[4][5]</sup> 특히 수술용 원격 제어장치의 필요성과 중요성이 대두되면서 미세한 촉감을 느끼기 위한 원격기술이 연구되고 있다. 이는 근 감각적인 정보의 필요성을 의미한다. 결국 슬레이브 시스템(Slave system)에서 느낀 촉감을 마스터 시스템(Master system)에서 정확하게 힘 레환이 이루어져야 한다. 모터 제어로 이루어진 기존의 시스템은 모터를 제어하는 모터 제어부와 감쇠력을 제어하는 감쇠력이 발생하는 부분의 부피가 크다. 또한 시스템과 외부 디바이스(External Devices)의 구축으로 인해 구조가 복잡할 뿐 아니라 정밀한 촉감에 대한 둔감에 문제가 있다. 또한 활동범위의 제한을 두고 있는 마스터 시스템의 활동범위가 매우 크기 때문에 작업 공간이 커지게 된다. 본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 기계적인 부하 장치를 ER유체(Electro-Rheological Fluid)를 사용하여 제어하고자 한다. 지능형 재료(Intelligent material) 또는 스마트 재료(Smart material)로 불리는 ER유체

는 외부에서 전기장을 가함으로써 유체의 점도를 변화시킬 수 있는 지능성 액체로, 기존의 액체가 기준 온도에서 하나의 점도만을 가지는데 비해 전기장의 인가에 따라 여러 가지 점도로 변화하는 성질을 가지고 있다. ER유체의 기본적인 특성은 ER유체에 전기장이 가해지면 유체내의 입자들이 클러스터를 형성하며 결합한다. 이로 인해 항복 전단 응력이 증가하면서 유동 저항이 증가한다. 전기장을 가하지 않을 때는 입자가 자유로이 이동하는 뉴토니안 유체(Newtonian fluid)상태이나, 전기장을 가해주면 유체내에 분산된 입자가 채인형 구조로 형성되어 항복 응력을 갖는 빙행 유체(Bingham fluid)상태로 변하게 된다. 이러한 성질과 특징으로 인해 여러 분야에서 그 응용성이 대두되고 있다.<sup>6)</sup>

따라서, 본 연구는 수술용 원격 시스템의 힘 반사 부분에 ER유체를 사용하여 마스터 시스템(Master system)에서 미세한 감쇠력을 느끼는 새로운 아이디어를 제시하고자 한다.

## 2. Tele-Surgery 시스템

### 2.1 Tele-Surgery 기술

원격 수술시 수술을 실시하는 의사들의 수술에 대한 정밀성과 숙련성이 충분한 수준에 이르렀지만 현대 의과 대학에서는 원격수술도구에 대한 불충분을 이유로 많은 수술에 대한 시술훈련이 효과적으로 이루어지지 않고 있다. 이러한 문제의 조속적인 해결을 힘 반사의 측면에서 본다면 마스터 시스템(Master system)과 슬레이브 시스템(Slave system) 간의 상호 작용적인 힘 반사 모의수술용 훈련시스템과 그에 대한 시행착오가 필요하다. 또한 원격수술의 수준이 마이크로 단위의 정밀도를 요구하는 부분을 로봇의 도움을 받아 수행해야 하기 때문에 기존 수술처럼 의사의 능력만을 요구하는 것은 아니다. 그러므로 시간지연이 없고 정밀한 힘 반사 마스터-슬레이브 시스템의 개발이 요구된다.

### 2.2 Tele-Surgery 시스템

양방향 원격 제어 시스템과 같이 복잡한 시스템은 전기, 전자, 기계, 생리학적 요소들의 복합으로 이루어지게 된다. 이러한 접근 방법으로 간단하게 모델링되는 시스템은 각각 두 개의 포트를 가지는 전기적 모델과 기계적 모델로 구성할 수 있다. 이러한 포트의 관심은 에포트변수(토크  $T_m, T_s$ )와 플로우변수(속도  $\Omega_m, \Omega_s$ )이다.

본 시스템은 에포트변수 관점에서 보아야 하며 플로우변수와와의 관계는 다음과 같다.

$$\Omega(s) = [Y(s)]T(s) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_m(s) \\ \Omega_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(s) & Y_{12}(s) \\ Y_{21}(s) & Y_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m(s) \\ T_s(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

결국 시스템표현은 어드미턴스 행렬(Admittance matrix)  $[Y(s)]$ 로 표현되어 진다. 또한 어드미턴스 행렬로부터 마스터 시스템과 슬레이브 시스템의 부하에 관한 지배 방정식이 표현되어야 하며 이는 다음과 같다.

$$T_m(s) = \frac{1}{Y_{11}(s)} \Omega_m(s) + \frac{1}{Y_{12}(s)} \Omega_s(s) \quad (3)$$

$$T_s(s) = \frac{Y_{11}(s)Y_h(s)}{Y_{21}(s)Y_h(s) + Y_{11}(s)Y_{21}(s)} T_h(s) + \frac{1}{Y_s(s)} \Omega_s(s) \quad (4)$$

또한 슬레이브 시스템에 부하가 존재할 때, 마스터 시스템의 어드미턴스는 다음과 같이 표현된다.

$$Y_m = \frac{Y_{11}Y_{12}Y_{21}(Y_h + Y_{22})}{Y_{12}Y_{21}(Y_h + Y_{22}) - Y_{11}Y_{22}Y_h} \quad (5)$$

만약 동적 시스템이 아닐 경우 선형적 결합에서 어드미턴스는 원하는 특성을 만족시키기 위해 조정 가능하다.

## 3. 시스템의 구성

시스템의 구성 및 구동 원리는 다음과 같다.

1. 마스터 시스템을 구동원으로 하고 모터 제어를 통해 슬레이브 시스템을 구동시킨다.
2. 슬레이브 시스템의 구동에 대한 정보와 힘/토크(F/T sensor)에 대한 정보는 컴퓨터에서 처리하게 된다.
3. 익스텐드 모드(Extend mode)하에서의 고전압 발생장치(High Voltage Power Supply)는 컴퓨터로 제어 가능하므로 신호의 변화에 대해 동작할 수 있다.
4. 신호의 변화에 따라 마스터 시스템의 감쇠부인 ER유체의 거동을 제어할 수 있게 된다.

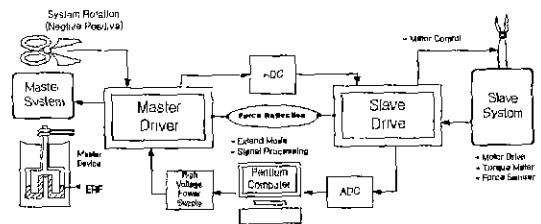


Fig. 1 Master-Slave System Components

### 3.1 Slave System

슬레이브 시스템에서 느끼는 충격으로 인한 토크는 회전에 대한 정보로 다음과 같다.

$$T_s = F_s L_s \quad (6)$$

여기서  $F_s$ 는 센서에서 느끼는 충격량이고,  $L_s$ 는 슬레이브 시스템의 회전 반경이다.

### 3.2 Master System

슬레이브 시스템의 정보와 더불어 마스터 시스템의 회전은 다음과 같이 표현되어 진다.

$$T_m = F_m L_m \quad (7)$$

마스터 시스템에서 전기장의 인가로 인한 ER유체의 특성을 고려하면 다음과 같다.

$$T_m(t) = \left( \eta \frac{du}{dy} + \alpha E(t)^\beta \right) \cdot A L_m \quad (8)$$

여기서  $\eta$ 는 ER유체의 점성계수이고,  $E(t)$ 는 고전압 발생장치에서 가해주는 전기장의 변화이다.

$A$ 는 ER유체가 있는 부분의 면적이고,  $L_m$ 은 마스터 앞의 회전 반경이다.  $\alpha, \beta$ 는 ER유체 조성시 사용된 입자의 크기와 형상, 중량비, 온도에 변화하는 고유치이다. 또한 본 연구에서 사용된 제어기는 PID제어를 사용하였으며 관계식은 다음과 같다.

$$K_{pid} = K_p e_{ss} + K_i \int e_{ss} dt + K_d \dot{e}_{ss} \quad (9)$$

본 실험에서 사용된 ER유체는 일본 BRIDGE-STONE사에서 제작된 미립자 분산형 ER유체이다. 이 분산형 ER유체는 직경이 수  $\mu\text{m}$ 인 미립자가 분산되어 유체의 작동영역에서 안정성이 탁월하며 점도는  $25[^\circ\text{C}]$ 에서  $93[\text{mPa} \cdot \text{s}]$ 이다.

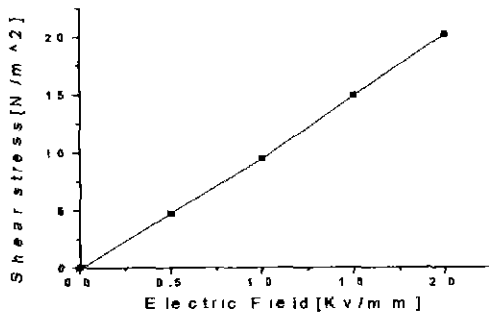


Fig. 2 Electric field-Shear stress relation

이 유체에서 전기장의 세기와 전단 응력의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} + \tau_y(E) \quad (10)$$

$\tau_y(E)$ 는 실험으로 인해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_y(E) = \alpha E^\beta = 10.36565E$$

## 4. 시뮬레이션 및 고찰

마스터-슬레이브 시스템의 성능을 평가하기 위한 시스템의 원리는 회전형 레오메타로 구성하였다. 회전형 레오메타는 시스템의 특성상 공축 원통계 (Coaxial cylinders[Couette] type)를 이용하였으며 협반사의 성능을 평가하기 위해 토크메타(Torque meter)를 이용하였다. 여기서 ER효과의 효율에 관련되는 사항은 내,외부 원통형에 대한 구동과 피동의 관계에 있다. 따라서 성능을 고려한다면 내부 원통을 피동축으로 하고 외부 원통을 구동축으로 시스템을 구성하는 것보다 성능의 향상을 위해 내부 원통을 구동기로 하고 외부 원통을 피동축으로 했을 때 그 성능이 우수하다.

힘 반사 관점에서 큰 감각적 정보는 많은 촉각 쾌환 장치의 개발에 기여하고 있다. 인간의 손은  $0.2 \text{ N/m}^2$ 이상의 압력과  $0.5 \text{ N}$ 이상의 힘의 변화가 있어야만 느낄 수 있다. 또한 인간이 느끼는 촉감의 공간 밀도 범위는  $11 \text{ mm}^2 \sim 101 \text{ mm}^2$ 이다. 본 연구 또한 이러한 미세한 힘 촉감에 대한 명확한 변화를 감지해야 한다. 따라서 낮은 토크의 변화에 대한 촉감을 감지해야 하므로 제어기의 설계, 파라메타(Parameter)의 선정, 낮은 전압에서의 ER유체의 거동에 대한 명백한 유동 특성을 고려하여야 한다.

힘 반사의 정보를 랜덤으로 보고 입력을 주었을 때 출력 신호와 그에 따른 에러 신호를 검출할 수가 있다. Fig. 3은 임의의 입력 랜덤 함수이고, Fig. 4는 ER유체의 거동에 따른 출력 신호이다. PID 제어기를 통한 출력신호는 입력 신호를 추정하며 따라간다. 그에 따른 에러검출 신호가 Fig. 5이다.

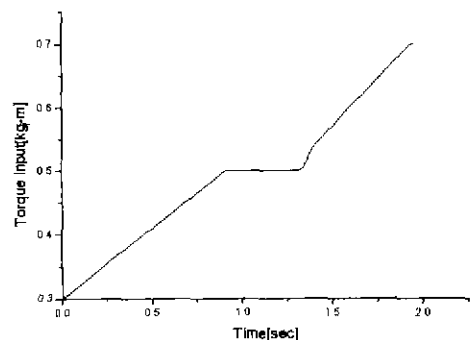


Fig 3. Reference input (Random function)

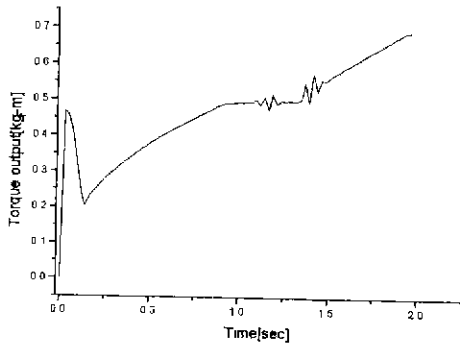


Fig 4. Response of PID control (Random function)

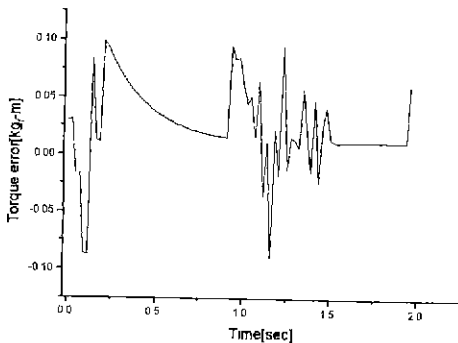


Fig 5. Error of PID control (Random function)

본 연구의 결과를 통해 마스터 시스템의 회전 정보가 크면 클수록 ER효과가 적게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 전기장의 세기에 따라 ER 유체내의 점도가 증가하는 것이 아니라 ER유체내의 입자의 클러스터 형성으로 인해 유체 유동이 저항력을 받아 점도가 증가하는 효과가 나타나는 것이라 볼 수 있다. 따라서 실제 적용에 있어서는 유체 클러스터 형성에 대한 정확한 거동을 포함한 지배 방정식을 구성함으로써 모델링 오차를 줄이는 것이 필요하다.

## 5. 결론

본 연구는 원격 제어 시스템의 마스터 암의 감쇠력 발생 부분을 ER유체를 사용함으로써 구조의 단순화, 소형화 문제의 대안을 제시하였다. 특히 원격 수술에 대해서는 미세한 힘 반사에 대해 큰 감각적인 정보는 매우 중요하므로 정밀하고 정확한 정보가 요구되고 있다. 이러한 관점에서 고도로 훈련된 의사와 많은 시행착오를 거친 로봇이 필요하다. 따라

서 향후과제로써 최근에 활발히 연구가 진행되고 있는 초정밀 로봇을 이용한 시스템에 대한 연구와 마스터 암의 감쇠력 발생에 대한 정확한 제어를 위해 ER유체의 거동에 관한 명확한 모델링 작업에 관한 연구를 필요로 하고 있다.

## 참고문헌

1. Jean Vertut and Philoppe Coiffet, "Teleoperation and Robotics," Kagan Page Ltd, Vol. 3A, 1985.
2. 손재범, 정완균, 엄영일, "원격 제어 시스템," 제어자동화 시스템공학회지, 제2권, 제3호, pp. 42-60, 1996.
3. K. Y. Woo, B. D. Jn, D. S. Kwon, "A 6 DOF Force-Reflection Hand Controller Using the Fivebar Parallel Mechanism," IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1597-1602, 1998
4. 김기호, 이정원, 이재철, 양명승 "마스터/슬레이브 매니플레이터를 이용한 원격절단", KACC, pp. 1273-1276, 1998
5. 송세경, 김완수, 권동수, 조형석 "미세수술용 매니플레이터의 개발을 위한 미세수술 작업 분석," KACC, pp. 1631-1634, 1997.
6. 주동우, 이은준, 박명관, "전기 점성유체를 이용한 동력 전달 장치에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제15권, 제10호, pp. 81-87, 1998