

# 보이스 코일형 모터를 이용한 햅틱 장치의 설계 및 제어

論文

51D-10-1

## Design and Control of Haptic Device using Voice Coil Type Motor

成 夏 慶\* · 范 鎮 桓\*\*

(Ha-Gyeong Sung · Jin-Hwan Borm)

**Abstract** - In this paper, force feedback control system is investigated for improving the quality of the haptic feedback in virtual reality applications. We suggested the method of controlling the haptic device and modelling the virtual environment. Haptic device is composed of five bar link structure, voice coil motor, control board, and virtual environment modeling program. We applied voice coil motor in the actuating system for simple structure and easy control. Virtual environment modelling is constructed in PC, and the control signals of the actuators and the encoder data are transferred to the control system through USB. Experiment is performed to evaluate the characteristics of the haptic device.

**Key Words** : Haptic device, Haptic interface, Force control, Human interface, Voice coil motor,

### 1. 서 론

디지털 및 컴퓨터 기술이 급속히 발전하여 인간과 컴퓨터 시스템간의 상호작용이 다양하게 이루어지고 있는데 최근에는 촉감 인터페이스가 관심 기술로 대두되고 있다. 촉감 인터페이스 기술은 힘 되먹임(force feedback)기술이라고도 하는데 시각이나 청각 정보와는 달리 힘 되먹임 장치(force feedback device) 또는 햅틱(haptic)장치를 통하여 물체의 무게나 단단함 등의 촉감을 전달하는 기술로서 최근 선진국을 중심으로 공학분야 뿐만 아니라, 의학, 미술 등의 여러 분야에서 많은 연구가 수행되고 있고 있다[1]. 특히 극한 작업 또는 해저에서의 원격작업시 작업현장에서 슬레이브 로봇에 가해지는 환경요인들을 작업자가 촉감으로 느끼면서 조작한다면 현실감이 높아져서 보다 효율적인 조작이 가능할 것이다[2].

본 논문에서는 이와 같은 햅틱장치를 구동하기 위한 액추에이터로 보이스 코일형 모터를 선정하였으며 이를 설계하고 제작하였다. 현재 연구되고 있는 햅틱장치들은 대부분 2자유도 이상의 복잡한 구조이면서 또한 상용모터를 사용하였지만 본 논문에서 제안한 장치는 컴퓨터 상에서 마우스를 대신할 수 있는 정도의 움식임과 그에 해당하는 힘을 세어하는 용도이므로 2자유도를 선택하였고, 여기에 상용화를 생각하였으므로 비용절감을 크게 감안하여 구동 액추에이터에 있어서는 보이스 코일형 모터를 사용하였다. 보이스 코일형 모터는 그 구조가 간단하고 일반 DC모터를 제어하듯이 정·역 및 토크

제어가 용이하므로 2자유도 구조에는 적절한 구동체라고 판단된다. 그리고 이 모터를 이용한 햅틱장치를 설계하고 이의 동역학 해석을 하였으며 이를 평가하기 위하여 평가 시스템을 제안하여 성능을 평가하였다. 또한 PC에서 간단한 가상환경을 구현하여 PC에서의 제어 및 가상환경의 힘을 전달하는 방법을 제안하였는데 여기서 PC와의 인터페이스는 최근 많이 사용하고 있는 USB를 이용하였다.

### 2. 보이스 코일형 모터의 설계

#### 2.1 보이스 코일형 모터의 설계

DC모터 또는 AC 서보모터 등의 일반 모터는 보통 수천 rpm의 회전수를 정격으로 하고 있으며, 단위 체적당 토크는 상대적으로 작다. 따라서 일반 회전형 모터를 그대로 이용할 경우에는 필요 토크를 만족하기 위하여 큰 용량의 모터가 필요하게 되며, 작은 용량의 모터를 사용하기 위해서는 감속기를 부착하여야 한다. 감속기를 부착하게 되면 감속기 자체가 가지고 있는 백래시(backlash)에 의해 정밀 위치제어나 미세 진동 등의 상태표현에 한계가 존재하게 되는 단점이 있으며, 감속기 자체의 마찰력이 존재하게 되어 모터의 발생토크를 완전히 '0'으로 한 경우에도 사용자가 완전한 힘 없는(force-free)상태를 느끼기가 어렵게 된다. 또한 구동기의 가격적 측면에서도 감속기를 부착한 DC모터가 보이스 코일형 모터보다 높다. 반면에 보이스 코일형 모터는 작동범위(회전할 수 있는 총 각도)에는 한계가 있지만 본 햅틱장치와 같이 제한된 작동범위만을 필요로 하는 경우에는 효과적으로 필요 체적을 감소시킬 수 있으며, 특히 전원을 인가하지 않은 상태에서의 마찰은 단지 베어링의 마찰만이 존재하게 되므로 매우 부드러운 햅틱장치의 구현이 가능하다. 또한 일반 모터에

\* 正 會 員 : 亞洲大學校 機械工學科 博士修了  
電子部品研究院 精密機器研究 센터長

\*\* 正 會 員 : 亞洲大學校 機械工學部 教授 · T.博

接受日字 : 2002年 5月 16日

最終完了 : 2002年 8月 30日

서 존재하게 되는 코깅 토크 등의 토크리플이 없기 때문에 원치 않는 힘의 발생이 없어 햅틱장치의 성능을 보다 높일 수 있다.

보이스 코일형 모터는 그림 1과 같이 영구자석과 공심형 코일, 자로를 구성하기 위한 back iron으로 구성되어진다. 보이스 코일형 모터를 설계하기 위한 사양은 햅틱장치 조작부의 힘의 세기와 기구부 설계 사양으로부터 결정되어졌으며, 햅틱장치의 설계사양 검토로부터 결정되어진 모터의 설계목표는 전류 700mA에서 50[kgfmm]이며, 총 운전구간은  $\pm 20^\circ$  내외로 하였다.

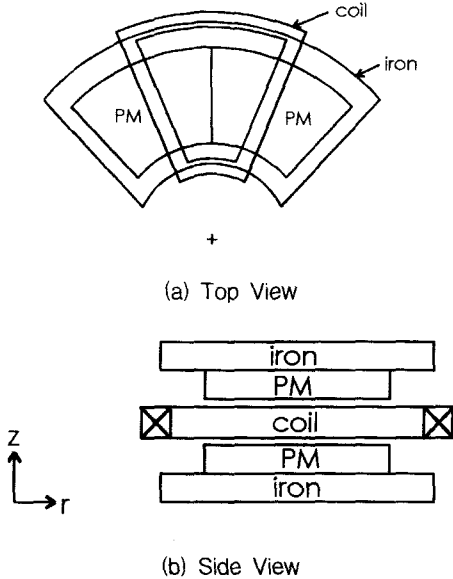


그림 1 보이스 코일형 모터의 개략적 구조도  
Fig. 1 Outline structure of voice coil type motor

설계를 위하여 수치해석법의 일종인 유한요소법을 이용한 2차원 해석방법을 이용하였다. 그림 2는 유한요소 해석을 위한 요소분할도를, 그림 3은 해석결과인 자속선도를 나타내고 있다.

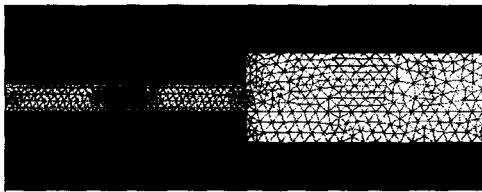


그림 2 모터의 유한요소해석모델  
Fig. 2 Finite element analysis(FEA) model of motor

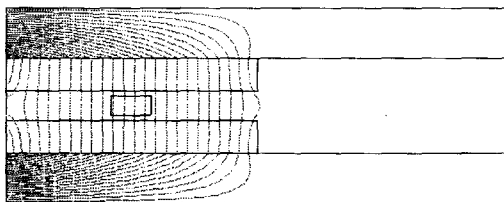


그림 3 유한요소해석을 통한 자속선도  
Fig. 3 Magnetic flux lines using FEA

그림 4는 영구자석의 형상이 그림 1과 같이 기본적인 형태를 가지는 경우의 공극 중앙부의 자속밀도값(수직, 수평방향)의 분포를 나타내고 있다. 영구자석 양 단부에서 프링징 효과로 인하여 자속밀도가 낮아짐을 알 수 있으며, 이로 인하여 이 구간에서는 단위 전류당 토크가 작아지게 된다. 따라서 이를 보완하기 위하여 공극자속밀도가 낮아지는 구역에 대해서는 영구자석의 형상변화를 주어 토크가 증가하도록 설계하였다. 설계된 보이스 코일형 모터의 주요 형상은 그림 5와 같으며 주요 설계결과를 표 1에 나타내었다.

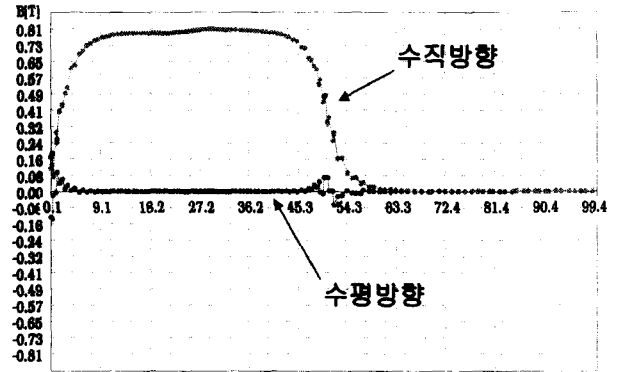
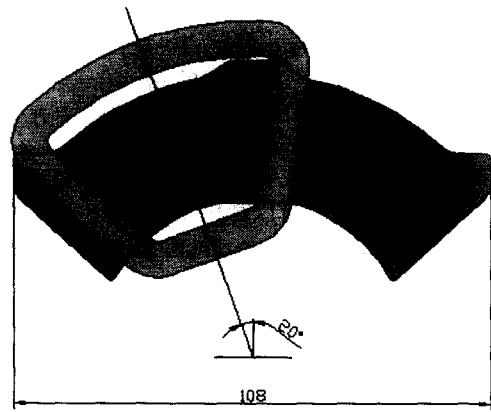


그림 4 공극 중앙부(코일 위치부)에서의 자속밀도 분포  
Fig. 4 Magnetic flux density distribution on the center of air gap



<상하방향 Dimension>  
Back iron의 두께는 최소두께임.

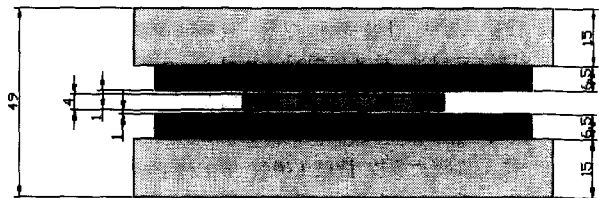


그림 5 설계된 보이스코일 모터의 개략도  
Fig. 5 Outline drawing of designed voice coil type motor

표 1 설계된 보이스 코일형 모터의 제원

Table 1 Specifications of designed voice coil type motor

항 목	사 양	항 목	사 양
영구자석 두께	6.5 [mm]	코일 선경	Φ 0.3 [mm]
영구자석 종류	NdFeB(소결)	코일 턴수	279 [turn]
잔류자속밀도	1.2 [T]	코일 저항	12.2 [Ω]
Back iron 두께	15 [mm]	코일체 폭×높이	8×4 [mm]
Back iron 폭	190 [mm]	코일체 외반경	76 [mm]
공극	1.0 [mm]	코일체 평균각도	55 [Degree]

그림 6은 영구자석에 대한 형상변화를 주어 최종 설계한 모터의 회전각도별 토크치 해석결과와 초기의 기본 영구자석 형상을 가지는 모터의 토크치 해석결과를 비교한 것으로, 초기형상의 경우에는 코일이 영구자석의 단부영역으로 회전함에 따라 발생토크가 감소하나 영구자석의 형상변화를 주어 설계한 경우에는 일정 토크를 나타내는 구간이 증가한 것을 알 수 있다.

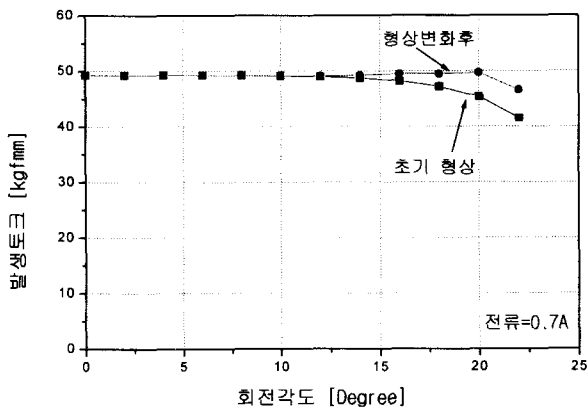


그림 6 영구자석의 형상변화 전후의 회전각도별 토크비교  
Fig. 6 Motor Torque according to rotation angle due to the magnet shape

2.2 보이스 코일형 모터의 특성평가

그림 7은 모터 단품에 대한 특성시험용 장치를 나타내고 있으며, 이를 통하여 시험한 회전각도별 발생토크는 그림 7과 같다. 여기서 단일 모터의 성능평가는 모터의 구동부에 풀리를 제작하여 설치한 후 실을 사용하여 로드셀과 연결하여 이 로드셀의 인디케이터를 읽는 방법으로 하였다. 단위전류당 발생토크는 ±19° 구간에서 거의 일정하였으며, 설계시 목표로 한 700mA 전류치에서의 발생토크는 54 [kgfmm]로 목표치보다 8% 높은 값을 나타내었다.

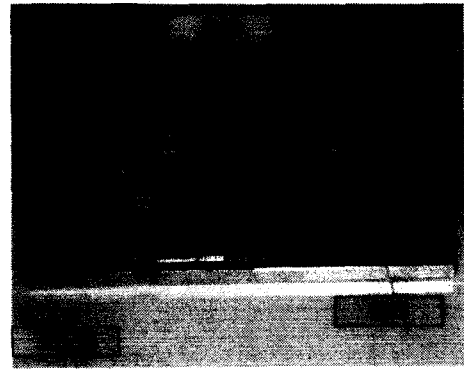


그림 7 제작된 모터 토크시험용 장치  
Fig. 7 Torque experimental set of motor

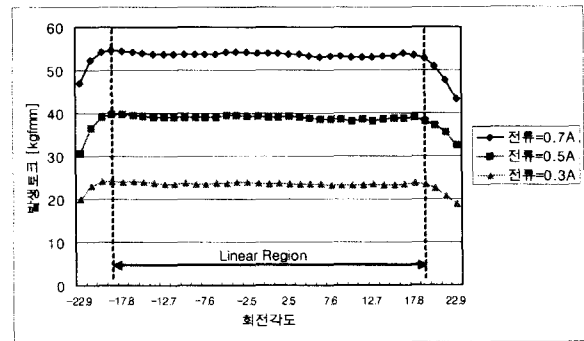


그림 8 모터 시작품의 토크특성 실험결과  
Fig. 8 Torque characteristic experimental result of motor

3. 햅틱장치의 설계

3.1 햅틱장치의 설계

이 햅틱장치는 사람이 제어할 수 있는 최대 힘을 10N으로 설정하였으며, 작동범위(work space)를 40×40mm 정도로 설정하였다. 그리고 링크구조는 2자유도이면서 견고한 5절링크 구조로 하였고[3], 2개의 보이스 코일형 모터를 구동원으로 사용하였다. 이 장치를 고안하기 위해 주안점을 둔 것은 큰 힘의 반향 제시 가능, 힘 제어의 용이성, 무 백래시화, 링크연결 부분의 마찰력 최소화이다.

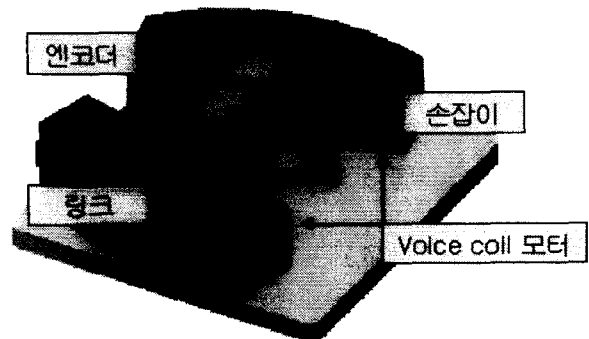


그림 9 햅틱장치 구조도  
Fig. 9 Structure of haptic device

이 장치는 작동자가 핸들을 손으로 잡고 X, Y평면상으로 움직일 수 있도록 하였다. 본 장치에서 보이스트 코일형 모터를 구동원으로 사용하여 모터의 제어를 용이하게 하였고, 직접 구동방식을 채용하였기 때문에 모터에서의 마찰력을 최소화하였다. 그리고 알루미늄재질의 링크 및 플레이트를 사용해서 경량화 및 저관성화를 이루었다.

3.2 기구학 해석

이와 같이 설계한 햅틱장치를 구동하기 위한 기구학 해석을 수행하였다. 그림10에서 구동축의 각도  $\theta_1, \theta_2$ 가 주어졌을 때의 끝단의 위치  $\mathbf{x}=(x, y)$ 를 다음과 같은 정기구학 해석으로 계산할 수 있다.

그림 10에서 수동관절(passive link)의 위치를  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  라 하면 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_1=(x_1, y_1)$$

$$x_1=l_1 \cos \theta_1-\frac{b}{2}, y_1=l_1 \sin \theta_1 \tag{1}$$

$$\mathbf{x}_2=(x_2, y_2)$$

$$x_2=l_1 \cos \theta_2+\frac{b}{2}, y_2=l_1 \sin \theta_2 \tag{2}$$

여기서,  $l_1$ 은 수동관절의 길이를 나타낸다. 그림 10에서  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  사이의 거리  $l_t$ 를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_t^2=\|\mathbf{x}_1-\mathbf{x}_2\|^2=l_1^2(2-2 \cos (\theta_1-\theta_2))+b^2-2 l_1 b(\cos \theta_1-\cos \theta_2) \tag{3}$$

그리고,  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  의 중심좌표를  $\mathbf{x}_c$ , 끝단의 위치  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_c$ 의 거리를  $l_m$ 이라 하면  $\mathbf{x}_c, l_m$ 은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_c=\frac{1}{2}\left(\mathbf{x}_1+\mathbf{x}_2\right), l_m^2=l_2^2-\left(\frac{l_t}{2}\right)^2 \tag{4}$$

여기서,  $l_2$ 는 끝단의 위치  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_1$  사이의 거리 즉, 끝단에 연결된 링크의 길이를 나타낸다. 그리고 끝단의 위치  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_c$ 와의 관계는 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{x}-\mathbf{x}_c=l_m(\cos \theta_c, \sin \theta_c) \tag{5}$$

여기서,  $\theta_c=atan(x_2-x_1, y_2-y_1)+\frac{\pi}{2}$

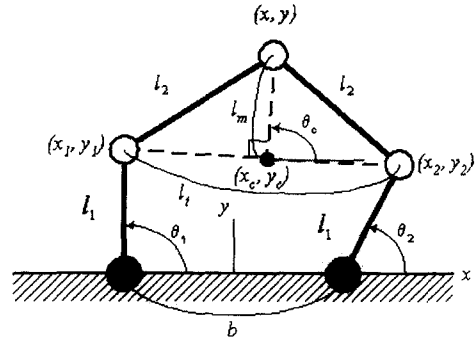


그림 10 5 Bar Link구조  
Fig. 10 Structure of 5 bar link

따라서, 식(1)-(5)를 이용하면 구동기의 각도  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 가 주어졌을 때 끝단의 위치  $\mathbf{x}$ 를 구할 수 있게 된다.

그리고 입력속도와 끝단에서의 속도사이의 관계식을 구하기 위해 식(6)과 같이 끝단과 각 수동관절사이의 관계식을 이용한다.

$$\begin{aligned} (x-x_1)^2+(y-y_1)^2 &=l_2^2 \\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2 &=l_2^2 \end{aligned} \tag{6}$$

위의 식(6)을 시간에 대해 미분하면 식(7)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (x-x_1)(\dot{x}-\dot{x}_1)+(y-y_1)(\dot{y}-\dot{y}_1) &=0 \\ (x-x_2)(\dot{x}-\dot{x}_2)+(y-y_2)(\dot{y}-\dot{y}_2) &=0 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서,  $\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_2$ 는 식(1)과 (2)로부터 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &=-\left(l_1 \sin \theta_1\right) \dot{\theta}_1, \dot{y}_1=\left(l_1 \cos \theta_1\right) \dot{\theta}_1 \\ \dot{x}_2 &=-\left(l_1 \sin \theta_2\right) \dot{\theta}_2, \dot{y}_2=\left(l_1 \cos \theta_2\right) \dot{\theta}_2 \end{aligned} \tag{8}$$

따라서, 식(8)을 식(7)에 대입하여 정리하면 식(9)과 같은 정속도 기구학 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} &=l_1 \begin{bmatrix} x-x_1 & y-y_1 \\ x-x_2 & y-y_2 \end{bmatrix}^{-1} \\ &\begin{bmatrix} -(x-x_1) \sin \theta_1+(y-y_1) \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -(x-x_2) \sin \theta_2+(y-y_2) \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{9}$$

여기서,  $\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}}$

그리고 가상 일의 원리를 적용하여 구동축에 작용하는 모터의 입력토크와 끝단에 작용하는 힘의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau}=\mathbf{J}^T \mathbf{f} \tag{10}$$

여기서,  $\tau$ 는 모터의 입력 토크,  $f$ 는 끝단에 작용하는 힘,  $J$ 는 자코비안(Jacobian)을 나타낸다. 이상과 같은 기구학 관계와 정역학 관계를 이용하여 2자유도 햅틱장치를 구동하게 된다.

### 3.3 기구학 해석 프로그램(Visual nastran)을 이용한 시뮬레이션

본 연구에서 설계된 구조에 있어서 위의 기구학 해석 결과를 전문 해석 프로그램인 Visual nastran을 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 3D CAD에서 작업된 데이터를 Visual nastran에 넘기고 각각의 조립조건에 구속 조건을 주어서 기구학 해석을 수행하였다. 구속 조건은 먼저 구동력을 회전모터로 지정하고, 각각의 링크의 연결부를 회전 조인트(revolute joint)로 구속 조건을 지정하였다. 이 시뮬레이션은 각각의 모터에 54kgfmm와 -54kgfmm의 토크를 주었을때, 햅틱 장치의 손잡이 부분의 변위(mm)와 걸리는 힘(N)을 시뮬레이션 한 결과이다.

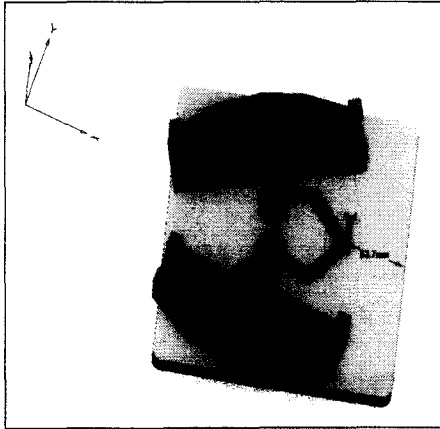


그림 10 시뮬레이션 전  
Fig. 10 Before simulation

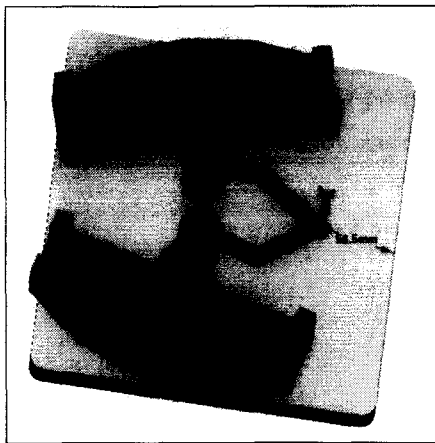


그림 11 시뮬레이션 후  
Fig. 11 After Simulation

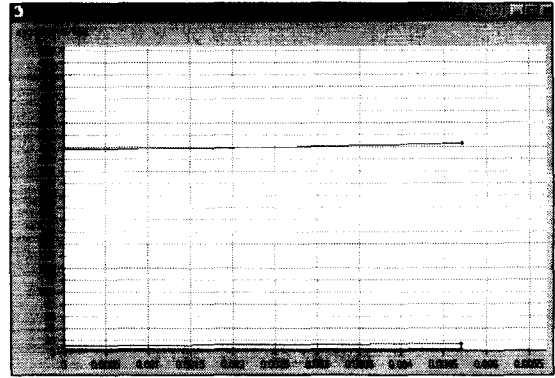


그림 12 시간당 손잡이 부분의 좌표  
Fig. 12 Coordinates of handle vs. time

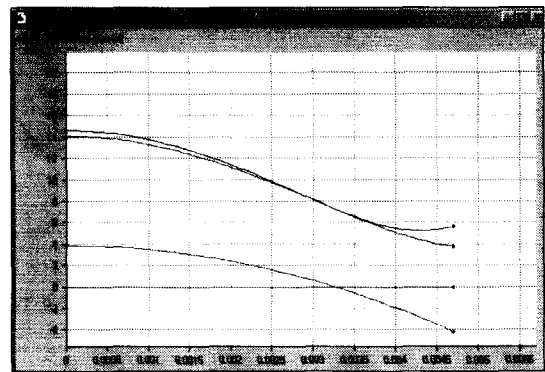


그림 13 시간당 손잡이 부분의 힘  
Fig. 13 Force of handle vs. time

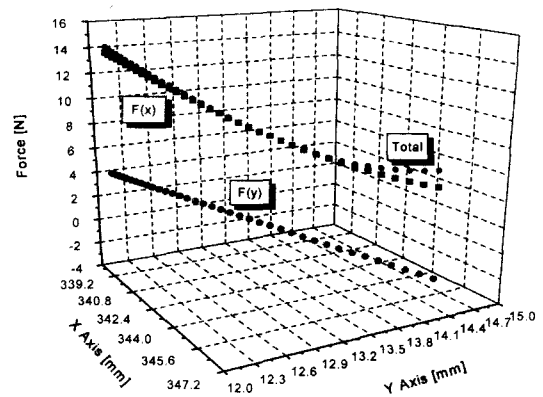


그림 14 X,Y 좌표당 손잡이 부분의 힘 변화  
Fig. 14 Force of handle vs. coordinates

그림 10과 11은 시뮬레이션 수행 전후를 나타낸 그림이다. 이 그림들은 시뮬레이션 이전과 이후의 링크 변화와 이에 따른 햅틱장치의 변화를 보여 주기 위한 것이다. 이 그림의 좌표축은 그림 10의 왼쪽 윗부분에 표시 되어 있으며, 손잡이 부분과 밀판 끝 부분의 거리변화가 그림에 나타나 있다. 그림 12는 시간당 손잡이 부분의 좌표 변화(변위)를 나타낸 그래프이며, 3축(x,y,z)에 대한 좌표 변화가 나타나 있다. 여기서 좌표는 그림 10에 표시된 좌표축을 기준으로 나타낸 좌표이다. 그림 13은 시간당 손잡이 부분의 힘의 변화를 나타낸

것이며, 여기에는 3축 각각에 대한 힘과 각축의 힘의 합력이 나타나 있다. 그림 14는 손잡이 부분의 X,Y 좌표 변화에 따른 손잡이 부분에 작용하는 힘의 변화를 나타낸 그래프인데, 이 결과 값으로부터 일정한 구동토크가 작용할 때 손잡이 부분이 햅틱장치 구동부에서 멀어 질수록 힘이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 위의 시뮬레이션은 햅틱장치의 최대 출력힘의 크기를 알아내어 모터 선정과 링크부 길이를 결정하기 위하여 수행한 것인데, 그림 14에서 보듯이 시뮬레이션 결과 손잡이 부분의 힘이 최대 14N정도 나타남을 알 수 있다.

#### 4. Haptic장치의 제어

##### 4.1 시스템 구성

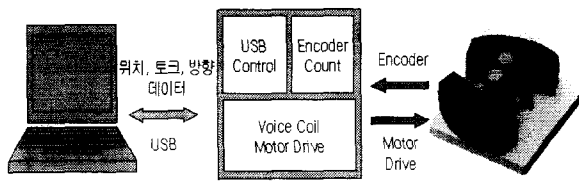


그림 15 전체 시스템의 구성  
Fig. 15 System block diagram

본 연구에서 구현한 시스템은 그림 15와 같이 가상환경 모델링 부분인 PC, PC로부터 제어명령을 받아 2축 모터를 구동하고 또한 엔코더를 카운트하여 다시 PC로 전송해주는 제어부, 그리고 2자유도로 설계되어 있는 햅틱장치 등 크게 세 부분으로 구성되어 있다. PC와 제어보드간의 인터페이스 방식으로는 최근에 많이 사용되고 있는 USB(Universal Serial Bus)를 사용하였다. USB는 최근 컴퓨터 기반의 인터페이스의 표준으로 자리잡은 방식으로 PNP기능이 막강하고 또한 속도의 이점이 기존의 시리얼 방식보다는 큰 장점을 가지고 있다.

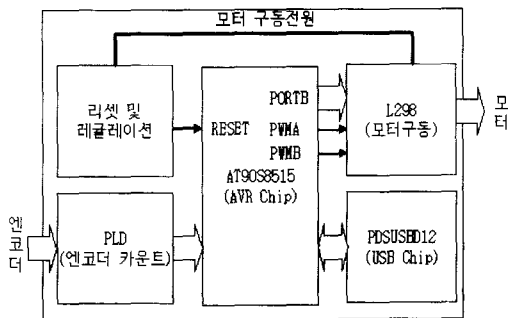


그림 16 제어보드의 구성  
Fig. 16 Block diagram of control part

그리고 본 연구에서 개발한 제어보드는 그림 16과 같이 구성되어 있다. 본 제어보드에 있어서 USB전용 컨트롤러 칩과의 인터페이스, 모터 드라이브 IC 제어, 그리고 엔코더 카운트 연산 등을 하기 위하여 마이크로 컨트롤러를 사용하였는데 8Bit이면서 강력한 기능을 가지고 있는 AVR계열의 AT90S8515를 사용하였다. 이 컨트롤러는 118개의 명령어 대부분이 한 클럭 사이클로 실행되는 고성능 저 전력의 RISC 구조로 되어 있고 데이터 및 비 휘성 메모리를 내장하고 있

어서 아주 커다란 기능의 프로그램이 아니면 외부 메모리가 필요 없고 단일 칩으로 프로그램을 할 수가 있는 등의 장점을 가지고 있다[4]. 그리고 다양한 주변장치가 있는데, 특히 두 개의 8/9/10비트의 PWM기능이 내장되어 있어 이를 이용하여 본 연구에서 제작한 햅틱장치 구동원인 2개의 보이스코일형 모터의 직접 토크제어가 가능하다[1][4].

##### 4.2 햅틱 장치의 성능평가

아래의 그림은 시제품의 힘을 측정하기 위한 구성도를 나타낸다.

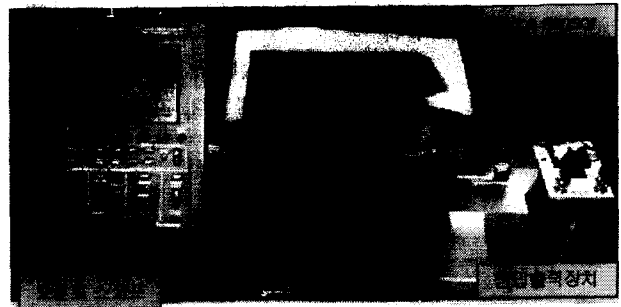


그림 17 성능평가 시험장치  
Fig. 17 Experimental set for performance evaluation

성능평가는 제작된 시제품의 조작부(Handle)를 힘 센서와 연결하여 바닥판에 고정시켜서 Y축 방향의 힘(미는힘, 당기는힘)을 측정할 수 있는 성능평가용 지그를 제작하여 수행하였다. Y축 방향으로의 힘을 힘 센서의 출력 전압으로 발생시켜 오실로스코프로 측정하였다.

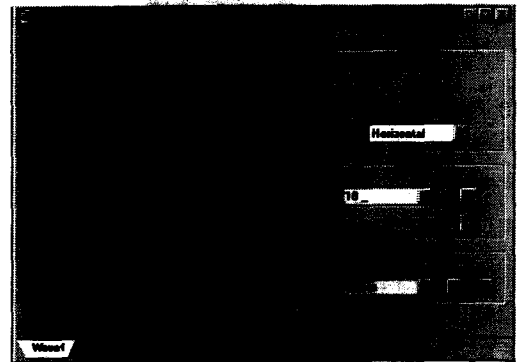


그림 18 측정된 최대 force  
Fig. 18 Maximum force measure

사용된 힘 센서는 순간변위 방식이므로 힘이 발생하는 순간 변하는 전압의 차이를 읽어야 한다. 그래서 현재 환경에서의 기준을 정하는 보정(calibration)작업이 필요하다. 2kg의 추를 이용하여 보정하였는데, 출력전압이 약 20V이므로 힘 1N에 1V의 전압이 측정되는 것을 알 수 있다. 그리고 제어보드에서 프로그램을 하여 순간적으로 모터에 최대 토크를 발생시켜 손잡이 부분의 힘을 측정장치로 측정하였다[2]. 실제로, 그림 18은 순간적으로 최대의 힘을 주었을때 측정된 화면인데 dY가 14.3V이므로 약 13N의 힘이 발생하는 것을 알

수 있다. 이는 3.3절에서 시뮬레이션한 값 14N과 거의 일치함을 알 수 있다.

**4.3 가상환경 모델링**

햅틱 장치의 모델링 및 시뮬레이션 프로그램은 크게 세 부분으로 나누어져 있다. 첫 번째는 기구학 및 정역학 계산을 위한 부분, 두 번째는 통신 등의 신호를 처리하기 위한 부분, 그리고 세 번째는 화면상의 가상환경을 구축하는 부분이다. 시뮬레이션 프로그램의 제어 흐름도는 그림 19와 같이 햅틱 장치를 초기화한 후 사용자의 조작에 따른 엔코더 신호의 변화를 체크하여 기구학해석과 정역학 해석을 수행하여 필요한 힘에 해당하는 크기의 모터를 구동시킨다. 이와 동시에 사용자의 조작에 의한 햅틱 장치 위치변화를 화면에 반영해 준다.

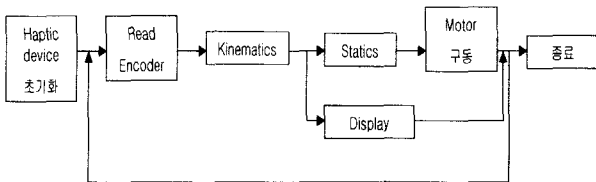


그림 19 가상환경 시뮬레이션 순서도  
Fig. 19 Flowchart of simulation program for virtual environment

본 연구에서는 가상환경 모델링으로 도너츠 모양의 가상 원통 벽을 구현하였다[5]. 도너츠 모양의 원통내부에 햅틱 장치의 끝단이 위치해서 도너츠 모양의 원통이 탄성을 가진 벽으로 느껴지도록 모델링한 것이다. 현재 끝단의 위치와 원의 중심과의 거리를 계산하여, 그 거리가 벽면의 반경과 끝단의 반경의 차이보다 큰 경우 끝단과 벽면과 충돌이 있다고 보아서 그 차이 만큼에 해당하는 힘을 발생시키도록 한다. 힘의 방향은 벽면의 중심과 끝단의 위치를 이용하여 계산한다.

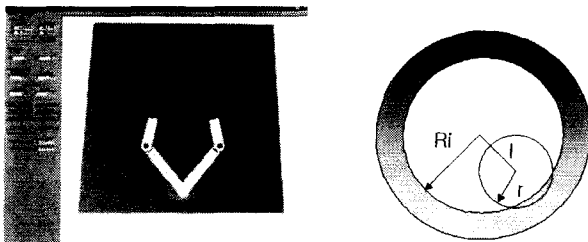


그림 20 가상환경 모델  
Fig. 20 Virtual environment model

**5. 결 론**

본 연구에서는 2자유도 햅틱 장치에 적합한 보이스 코일형 모터를 제안하여 설계, 제작하였고 이를 이용한 햅틱장치 및 제어보드 등을 제작하였으며 성능을 힘 센서를 통하여 측정하였다. 또한 PC를 이용하여 가상환경에서 작용하는 힘을 사용자에게 전달할 수 있는 시스템을 구현하였다. 가상환경 모

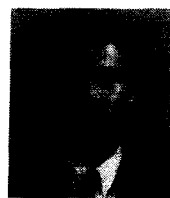
델링에서는 햅틱장치의 끝단과 가상물체 사이의 거리를 이용하여 도너츠 모양의 가상 원통 벽 모델을 구현하였다[5].

그러나, 본 연구에서는 가상환경 모델을 단순히 거리의 차이를 이용한 힘만을 계산하여 스프링 효과의 힘만을 구현하였다. 앞으로 이를 응용하여 물체의 질감 등의 다양한 촉감을 느끼는 방법에 대한 연구가 필요하겠다. 그리고 본 연구에서 제작된 2자유도 햅틱 장치를 응용하여 보다 높은 자유도와 다양한 구조를 갖는 햅틱 장치를 설계할 수 있을 것이다.

**참 고 문 헌**

- [1] 엄광식, 서일홍, "투명성과 강인 안정성을 고려한 1자유도 햅틱 인터페이스 제어기 설계", 대한전기학회논문지, 49D권, 4호, pp. 213-219, 2000. 4.
- [2] Grigore C. Burdea, "Force and Touch Feedback for Virtual Reality", John Wiley & Sons, Inc., pp.65-71, 1996
- [3] Leo J. Stocco, Septimiu E. Salcudean, Farrokh Sasani, "Optimal Kinematic Design of a Haptic Pen", IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, No. 3, September 2001
- [4] 조영준, "쉬운 예제와 Kit로 배우는 AVR", Ohm사, pp. 115-130, 2001
- [5] Ming Ouhyoung, Wu-Nam Tsai, Ming-Chang Tsai, "A LOW-COST FORCE FEEDBACK JOYSTICK AND ITS USE IN PC VIDEO GAMES, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 41, No. 3, AUGUST 1995

**저 자 소 개**



**성 하 경(成 夏 慶)**

1960년 9월 13일생. 1986.2 한양대학교 기계공학과. 1995년 한양대학교 기계공학과(공학석사). 2001년 아주대학교 기계공학과 박사수료. 2002년 현재 전자부품연구원 정밀기기연구센터장  
Tel: (032) 621-2841  
E-mail: sunghg@keti.re.kr



**범 진 환(范 鎭 桓)**

1956년 3월 8일생. 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1985년 Ohio State Univ. 기계공학과(공학석사). 1988년 Ohio State Univ. 기계공학과(공학박사). 2002년 현재 아주대학교 기계공학부 교수  
Tel : (031) 219-2343  
E-mail: jhborm@ajou.ac.kr