

초음파 모터 구동 역감 장치에 부착한 전기자극 촉감 장치의 설계

김동옥*, 강원찬*, 김성철* 오금곤**, 김영동***

*조선대학교 대학원 제어계측공학과, **조선대학교 전기공학과, ***조선대학교 정보제어계측공학과

Design of the Electric Stimulus Tactile Apparatus Loaded on the Haptic Interface Using Ultrasonic Motors

Dong-Ok Kim*, Won-Chan Kang*, Sung-Cheol Kim*, Geum-Kon Oh**, Young-Dong Kim***

*Dept. of Control & Instrument Eng., Graduate School of Cho-Sun Univ.

**Dept. of Electrical Eng., Cho-Sun Univ

***Dept. of Infomation Control & Instrument Eng., Cho-Sun Univ.

ABSTRACT

This paper proposes the electric stimulus tactile apparatus system(TESTAS) loaded on the haptic interface using ultrasonic motors(USMs).

To touch the virtual object like wall in graphic, the 6 DOF haptic interface provides force feedback to users as if it is real. But the case of sharp virtual object like a puncture, it could not provided the sense of pain, but only the reaction-force. After the TESTAS had been loaded on this haptic interface, it could provide not only the force but also the pain to users.

To estimate the capability of TESTAS, we did experiments of three cases, one was very sharp, another was dull, the other is continuative contact.

1. 서 론

가상 현실(Virtual Reality)은 시각, 청각, 운동감각 및 촉각 등을 인공적으로 사용자인 인간에게 제시하여 직관적으로 사용자가 가상환경에 몰입할 수 있게 하는 기술이다^[1]. 과거에는 가상물체와 사용자의 상호 작용에 관한 시각적 표현에 주력하였으나, 최근 가상 물체에 대한 더 다양하고 정확한 정보를 사용자에게 전달하기 위해서 역감(force feel) 및 촉감(tactile feel)제시의 필요성이 부각되고 있다.

역감 및 촉감 제시를 위한 연구는 국내·외에서 활발히 진행되고 있으며, 여러 가지 방식의 역감 및 촉감 제시기구가 개발되고 있다.

대표적인 역감 제시 기구는 스텐더트 플랫폼을 사용한 Iwata의 Haptic Master, T.H. Massie의 PHANTOM, 아이오와 주립대의 Exoskeletal System, 일본 동경공업대의 M. Sato 교수 등이 개발한 SPIDAR가 있다^{[2]-[5]}. 이들은 대부분 소형

DC 서보 모터나 마그네틱 장치를 사용하며 토크의 증가를 위해서 케이블이나 기어를 이용하므로, 백러시나 기구의 부피 및 무게 증가, 작업공간 축소 등의 단점을 보이기도 한다.

한편으로 촉감 제시 기구는 시각을 이용한 방법, 공압자극을 이용한 방법, 형상기억합금 응용 방식, 진동자극을 이용한 방법, 전기자극을 이용한 방법 등이 있다. 공압자극 방식의 대표적인 것은 Medical Robotics Lab에서 개발한 원격 수술용 촉감 제시 기구가 있다. 이것은 여러 공압관 때문에 부착하기 힘들고, 작업시에 간섭을 일으키는 문제가 있다. 형상기억 합금 응용방식은 Karlsruhe Research Center의 H. Fischer가 형상기억 합금을 이용해 개발한 촉감 제시 기구가 있다. 이는 냉각 장치 장착시 손 끝마디에 부착하기 힘들고, 응답성이 떨어져서 실시간 작업이 어렵다. 진동 자극 방식은 많은 연구 사례가 발표되고 있으며, 미국 하버드 대학의 Robert D. Howe 교수 등의 진동 구현 장치가 있다. 그밖에도 철선 다발을 이용한 촉각 장치, 전자석의 흡인력을 이용한 촉감 제시 기구 등이 발표되고 있다^{[6]-[7]}.

촉감은 세밀한 접촉 반발력에 관한 정보를 제공함으로써 물체의 재질과 질감 등을 인식하는데 매우 중요한 감각이다. 그러나 위에서 서술한 촉감 제시 기구가 제시하는 촉감은 한계가 있으며, 미세한 촉감의 표현은 매우 어렵다. 또한 촉감 제시 기구들은 대부분 손가락 끝마디에 부착이 어렵다는 점과 선형제어가 어렵고 응답이 낮으며, 장시간 동작했을 때 피로에 따른 감각 둔화 등의 문제점을 개선시켜야 한다는 과제가 남아있다.

가상 물체와 접촉했을 때 역감과 촉감을 동시에 제시하면 좀 더 정확하고 다양한 접촉 정보를 사용자에게 제시할 수 있다.

본 논문에서는 역감 장치의 말단 장치에 전기 자

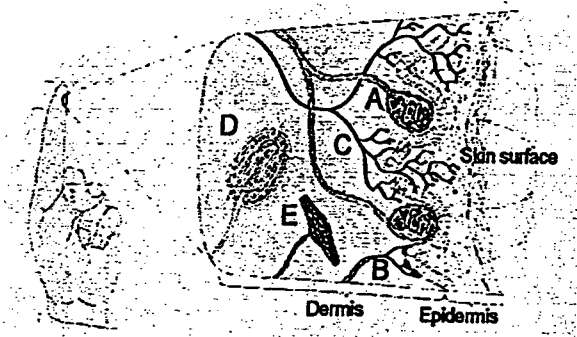
극을 부여함으로써 역감과 촉감을 동시에 제시할 수 있는 역감-촉감 제시 장치를 제안하고 한다. 이를 위해서 앞서 제작한 초음파 모터 구동 6자유도 역감 장치의 말단 장치 하단에 전기 자극을 이용한 촉감 제시 기구를 부착하였다.

2. 인간의 촉감 및 역감 시스템^[8]

2.1 촉감 시스템

인간의 피부 안쪽에는 여러 가지 센서에 해당되는 기관들이 그림 1과 같이 존재하여 외부로부터 힘, 진동, 압력, 온도 등을 감지하여 촉감을 느끼게 된다. 손바닥과 같이 털이 존재하지 않는 피부는 표피(epidermis), 진피(dermis), 피하조직(subcutaneous fat) 등으로 층을 이루고 있으며 내부에는 마이네스 소체(Tactile meissner's corpuscle), 촉반(Tactile Merkle's corpuscle), 파치니 소체(Pacinian corpuscle), 루피니 소체(Ruffini corpuscle) 등의 센서가 자유신경종말(Free terminal)에 연결되어 외부적인 자극을 감지하고 있다. 이러한 외부 자극에는 기계적 자극, 전기 자극, 열성 자극, 화학적 자극 등이 있다. 전기 자극은 자극을 쉽게 가하거나 제거하기가 쉽고, 그 펄스 진폭과 주파수, 파형, 통전 시간, 듀티비 등 다양한 자극을 줄 수 있어 가장 많이 사용된다.

주로 전기 자극은 물리 의학에서 치료적 기술로 많이 사용되어 왔으며, 신경근 전기 자극(NMES)과 경피 신경 전기 자극 치료기(TENS)등으로 알려져 왔다. 본 논문에서는 전기 자극을 통하여 생성할 수 있는 여러 가지 자극 중 통증에 대한 감각, 즉 통각을 이용하였다. 통증이란 신체에 가해지



- A-마이네스 소체(Tactile meissner's corpuscle)
- B-촉반(Tactile Merkle's corpuscle)
- C-자유신경종말(Free terminal)
- D-파치니 소체(Lamellated(Pacinian) corpuscle)
- E-루피니 소체(Ruffini corpuscle)

그림 1 인간의 피부 감각 기관
Fig. 1 The skin receptor of human

는 자극에 대해 유발되어 감지되는 감각으로 신체 조직의 손상이나 이를 미연에 방지할 수 있는 느낌이다. 인간은 통증을 느낌과 동시에 외상을 받지 않는 조직을 보호하려는 여러 행동을 나타낸다.

2.2 역감 시스템

인간의 역감 기관은 근육이나 힘줄, 관절 등에 있는 신장 수용 기관을 말한다. 이 기관에서는 외력에 대한 근육이나 관절의 위치변화를 감지하고 각각의 결합력에 대한 신호를 신경계통을 통해 뇌로 보낸다. 뇌에서는 이 신호를 해석하여 외력에 의해 발생한 접촉력과 수축의 위치를 추정한다. 가상 물체의 존재 여부와 형상등에 관한 정보는 이와 같은 역감 기관을 통하여 곧바로 감지된다. 역감 장치는 인간 신체의 일부분에 외력을 제공함으로써 역감 기관을 자극시킨다. 따라서 근육의 운동감각 및 힘의 감각들을 액츄에이터의 토오크로 표현함으로써 가상 물체를 감지 및 조작할 수 있다.

표 1 손의 힘 감지 능력

Table 1 Forces on the fingers of normal adults

Fingers	Index finger	Middle finger	Ring finger	Total
Force	7N	6N	4.5N	30~50N

손목 관절을 몸 전체가 지지하는 경우 손목 관절에는 상당히 큰 힘을 발휘할 수 있는데 일반 성인을 기준으로 평균적인 관절의 굴곡작용을 고려했을 때 200N 정도의 힘을 발휘한다. 또한 인간의 손 자체가 발휘할 수 있는 힘은 30~50N 정도이다. 표 1은 일반 성인이 감지할 수 있는 힘의 범위이다. 손가락은 인간 피부의 어느 부분보다도 예민한 감각 기관으로서 손가락 끝의 1cm² 당 약 135개 정도의 감각 세포들이 분포되어 있고, 재질감을 느낄 때는 1,000Hz 정도의 진동에도 반응하지만 대략 230Hz대에서 가장 민감하게 반응한다. 손가락은 320Hz를 넘어선 힘 신호들을 구별할 수 없고 단지 진동만을 느끼게 된다.

3. 역감 및 촉감 제시 장치

3.1 6자유도 역감 장치^[9]

역감 장치는 평형 메커니즘을 응용하여 2개의 액츄에이터를 베이스 측면에 고정시킨 병렬구동형 2자유도(y축, z축)와 베이스 밑면에 하나의 액츄에이터를 고정시킨 1자유도(x축), 엔드이펙터에 세 개의 엔코더를 장착한 수동 3자유도로 총 6자유도

의 데스크-탑형 디바이스이다. 사용되어진 액츄에이터는 엔코더 장착형 초음파 모터를 사용하여 능동 3자유도를 표현했다. 엔드이펙터의 위치는 3개의 엔코더의 출력 펄스를 통하여 계산되어지고, 이 엔드이펙터의 위치 정보에 따라 x, y, z축 방향의 힘을 제어한다. 모터의 토크는 가볍고 단단한 링크에 대해 직접구동방식으로 전달된다. 이 링크의 끝은 소형 엔코더 3개를 부착시켜 손가락 포인터방향을 3차원으로 제시하였다.

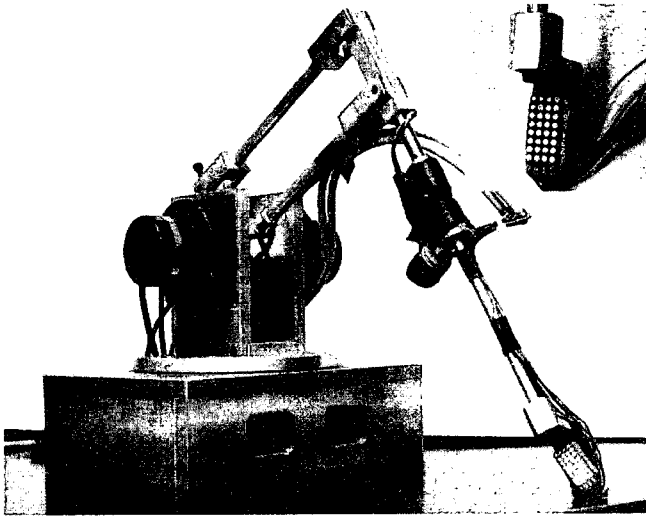


그림 2 TESTAS를 부착한 6자유도 역감 장치
Fig. 2 The 6 DOF haptic interface loded on TESTAS

표 2 역감 장치의 링크 파라미터
Table 2 Link parameter of haptic interface

Link parameter	Joint	θ_i	α_i	a_i	d_i
1		θ_1	$-\pi/2$	0	d_1
2		θ_2	π	L1	0
3		θ_3	$\pi/2$	L2	0
4		θ_4	$\pi/2$	0	0
5		θ_5	$-\pi/2$	0	0
6		θ_6	0	0	0

힘 반향 역감 장치의 외형은 그림 2와 같고 역감 장치 링크 파라미터는 표2와 같다.

본 연구에서는 저속, 고토크 특성을 가진 초음파 모터를 사용하여 직접구동방식(direct drive)으로 능동적 3자유도와 수동적 3자유도, 총 6자유도의 데스크-탑형 힘 반영 역감 장치를 사용하였다. 역감 장치의 액츄에이터인 초음파 모터는 그 구조가 단순하고, 소형 경량이며, 저속-고토크 특성을 지녀 DD(Direct Drive)방식을 채용하기에 적합한

모터이다. 그러므로 속도변환을 위해 기어나 풀리 등 기계적 장치가 필요 없어 역감 장치의 무게를 현저히 줄일 수 있었다^[10].

역감 장치의 반응력 제공은 초음파 모터의 2상(A상, B상) 입력전원의 위상차 조절에 의한 점탄성 제어를 통해서 실현시켰다. 사용된 역감장치 제어기는 Lattics사에서 제작한 pLSI(ispLSI 1016)칩을 사용하여 PC로부터 위상차 값을 입력받아 초음파 모터의 B상의 위상을 0° 에서 180° 까지 변화시킬 수 있도록 설계하였다.

Denavit-Hartenberg법을 적용하여 기준 좌표계에서 엔드이펙터의 작용점 위치까지 변환 행렬을 구한 후 기준 좌표계에서 엔드이펙터의 작용점 P의 위치를 구하면 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 C_1 C_2 + L_2 C_1 C_{2-3} \\ L_1 S_1 C_2 + L_2 S_1 C_{2-3} \\ -L_1 S_2 - L_2 S_{2-3} + d_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $C_{i-;j} = \cos(\theta_i - \theta_j)$, $S_{i-;j} = \sin(\theta_i - \theta_j)$ 이다.

가상 객체에 접촉하면 반응력이 계산되고 이것에 비례한 토크를 발생시키도록 식(1)을 편미분하여 자코비안 행렬의 전치 행렬을 구하면 식(2)와 같고 이렇게 계산된 결과는 출력시에 이용된다.

$$J^T = \begin{bmatrix} -L_2 S_1 C_2 - L_1 S_1 C_2 & L_2 C_1 C_{2-3} + L_1 C_1 C_2 & 0 \\ -L_2 C_1 S_2 - L_1 C_1 S_2 & -L_2 S_1 S_{2-3} - L_1 S_1 S_2 & L_2 S_1 S_{2-3} \\ -L_2 C_1 S_{2-3} & L_2 S_1 S_{2-3} & L_2 C_{2-3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

역감 장치 제어기의 전원 공급 회로부에서는 pLSI부에서 만든 두 개의 5V의 펄스를 2단 트랜지스터 스위칭 증폭회로와 펄스변압기(pulse transformer)를 통해서 100Vpp를 증폭하여 초음파 모터의 A상과 B상에 각각 공급한다. 엔코더는 1회전당 1000펄스의 분해능을 가지며, 엔코더 신호는 엔코더 어댑터에서 4채배 후 사용한다.

말단 장치의 위치는 이 엔코더 값을 이용하여 계산하며 가상 객체와의 그래픽 렌더링을 거쳐 PC에서 반응력이 구해지면 내부 토크와 선형적인 관계를 가지는 위상차를 초음파 모터의 제어 신호로 입력해서 사용자에게 실제와 같은 반응력을 전달하게 된다. 초음파 모터는 토크센서를 사용하지 않고 위치 변화만을 피드백 신호로 사용하기 때문에 기존의 힘 제한 제어에 비해 제어시스템을 간단히 구성할 수 있을 뿐 아니라 응답이 빠른 장점이 있었다.

3.2 전기 자극 촉감 장치(TESTAS)

본 실험에서 제작한 TESTAS는 자극이 여러 곳에서 동시에 일어났을 때의 촉감 제시를 위해 8개의 채널을 두었으며, 다른 일반적인 역감 장치에도 쉽게 부착될 수 있게 설계하였다.

TESTAS는 파형은 구형 펄스파이며, 주파수는 1Hz에서 200Hz까지 조절이 가능하다. 이 펄스는 D/A컨버터와 펄스트랜스를 통해서 0~100V까지 조절할 수 있다. 또한 전류는 70mA로 고정하고, 듀티비는 LM629를 이용해서 1/128까지 미세 조절이 가능하도록 설계하였다.

그림 3은 가상 객체와 손가락이 접촉하는 경우의 모델을 나타낸 것이며, 접촉되는 손가락의 포인터를 같은 크기의 사각면으로 정의하고 이 면과 겹치는 순간의 가상 객체의 폴리곤 수를 이용해서 전기 자극 강도를 조절하였다. 전기 자극의 강도는 전압에 의해서 정해지고, 가상 객체 종류에 따라 그 크기를 달리하였다. 또한 듀티비를 조절해서 날카로운 물체와 무딘 물체에 접촉했을 때의 촉감을 상이하게 제시할 수 있다.

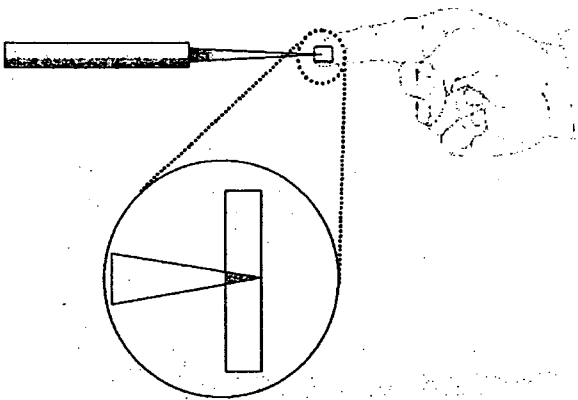


그림 3 손가락과 가상 송곳의 접촉 모델
Fig. 3 The contact model of virtual puncture

4. 실험 및 고찰

역감 프리미티브(primitive)라고도 하는 가상물체는 실제의 물체와 같은 감각을 시뮬레이트하기 위해 컴퓨터에서 생성된 기하학적인 도형에 재질 정보를 입힌다. 이를 위해 라이트웨이브(Light Wave 3D)로 프리미티브를 제작하고, 프로그램에서 읽어들이면서 점성 및 탄성, 자극 정보들을 포함시키도록 하였으며, 실시간 처리에 있어서 촉각 주기는 1[kHz], 그래픽 주기는 20[Hz]의 조건으로 설정하

였다.

실험은 단일 접촉과 연속 접촉 두가지의 경우에 대해서 행하였고, 단일 접촉 실험은 가상 객체의 끝이 날카로운 것과, 무딘 경우의 객체에 대해서 행하였다. 그리고 이에 따른 결과를 가상 객체의 끝점에 접촉했을 때의 펄스 파형을 도시하였다.

점탄성 특성이 다른 가상 객체에 대한 접촉 실험은 이미 검증하였으므로 가상 객체의 점탄성 변화는 주지 않고, 벽과 같은 딱딱한 물체에 대한 실험만을 행하였다^[9].

날카로운 가상 객체이었을 때 전기 자극 강도가 높았으며 보다 더 날카롭고 강한 자극을 위해서는 듀티비를 상대적으로 매우 작게 설정해야만 했다.

전원은 Tektronix PS2521G를 사용하였고, 파형 측정에는 500MHz Storage Oscilloscope(Lecroy 93542)를 사용하였다.

4.1 단일 접촉의 경우

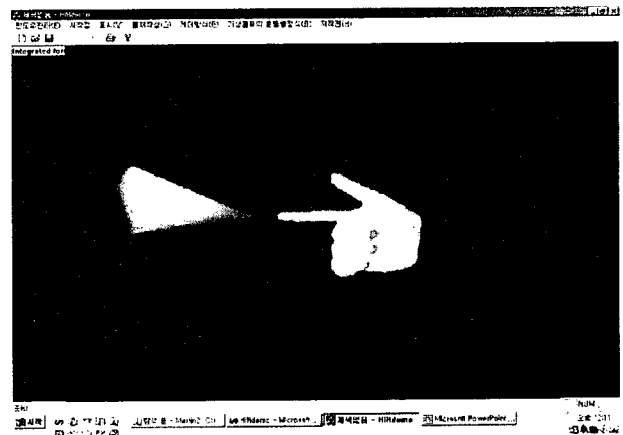


그림 4 날카로운 가상 객체와의 접촉 모델
Fig. 4 Contact model of virtual object to be sharp

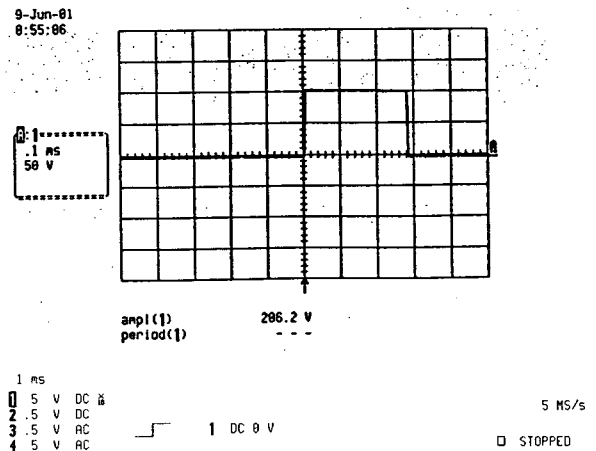


그림 5 그림 4 실험의 출력 파형
Fig. 5 Output waveform of Fig. 4

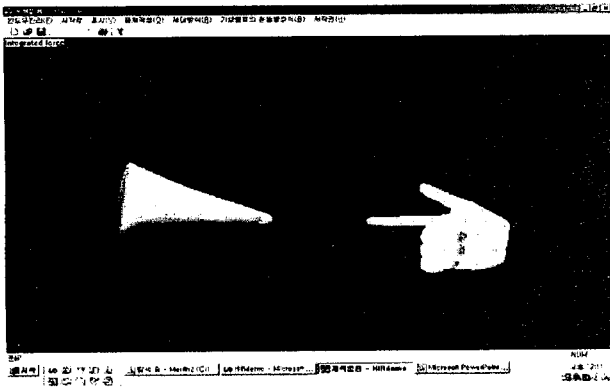


그림 6 무딘 가상 객체와의 접촉 모델
Fig. 6 Contact model of virtual object to be dull

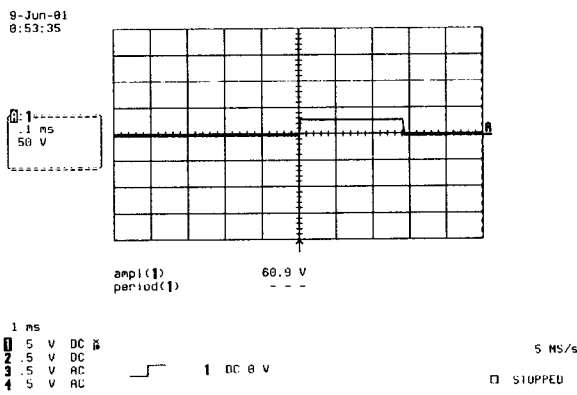


그림 7 그림 6 실험의 출력 파형
Fig. 7 Output waveform of Fig. 6

4.2 연속 접촉의 경우

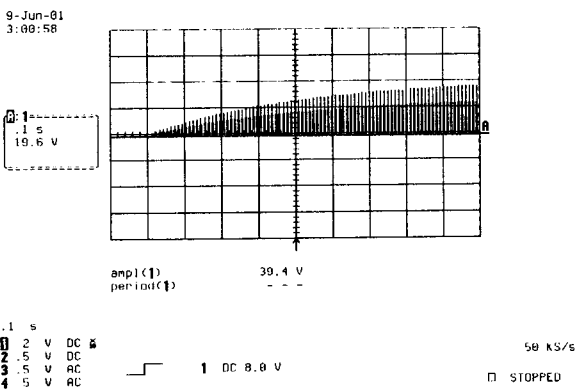


그림 8 연속 접촉의 출력 파형
Fig. 8 Output waveform of continuative contact

4.3 고찰

단일 접촉 실험에서 날카로운 가상 객체에 접촉했을 시 전기 자극의 크기는 100V이었고, 주기는 약 0.28ms이었으며, 실제로 송곳에 찔렸을 때와 유사한 통증을 사용자에게 제시할 수 있었다. 무딘 가상 객체의 경우에는 같은 주기에 20V이었으며, 사용자는 미세한 자극을 제시받아서 전기 자극에 의한 촉감보다는 역감에 의한 딱딱한 느낌을 제시받았다. 연속적인 접촉 실험에서는 가상

객체에 접촉했을 때 바로 떼지 않고 계속해서 밀었을 때 점점 자극이 커짐을 알 수 있다. 처음에는 미세한 자극에서 40V까지 연속적으로 증가하였다.

5. 결론

가상현실 장비가 고가라는 점을 감안할 때 앞으로 개인용 가상 현실의 보급은 절대적으로 단일 PC 기반이어야 한다. 본 논문에서는 단일 PC 기반에서 초음파 모터 구동 6자유도 역감 장치의 말단 장치에 전기 자극을 이용한 통증을 제시할 수 있는 TESTAS를 부착시킨 후 역감과 촉감을 동시에 제시할 수 있는 시스템을 설계하였다.

역감과 촉감을 동시에 제시했을 때 사용자는 역감만을 제시받았을 때 보다 가상 객체에 대한 다양하고 정확한 정보를 얻을 수 있다. 다시 말하자면, 역감 장치만을 이용해서 가상 송곳과 같은 날카로운 객체와 접촉했을 때는 단순히 송곳의 재질에 따른 점탄성 특성만을 제시할 뿐이다. 하지만 TESTAS를 부착해 사용하면 역감 뿐만 아니라 마치 실제로 송곳에 찔리는 듯한 촉감을 동시에 제시할 수 있었다.

본 논문에서는 실제 손가락이 받을 수 있는 여러 가지 자극중 단순히 통각을 이용했을 뿐이다. 또한 단순한 가상 객체만을 설계했지만 좀 더 다양하고 복잡한 가상 객체를 만들어 접촉했을 때 생기는 여러 가지 자극에 대한 연구와 냉·온각도의 촉각 제시에 대한 연구가 앞으로 이루어질 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Gradecki, J. : The Virtual Reality, New York : John Wiley & Sons, 1994
- [2] Iwata, H.: Pen Based Haptic Virtual Environment. VRAIS '93, pp. 287~292, 1993.
- [3] Massie, T. H. and Salisbury, J. K., "The PHAN- ToM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects," Proc. of ASME Winter Annual Meeting, Chicago, 1994.
- [4] Sarcos, Inc. : Manufacturers of the Sarcos Exoskeleton. Salt Lake City, Utah.
- [5] S. Kim, W. Somsak, M. Ishii, M. Sato, "Personal VR system for rehabilitation to hand movement." IACT 98, pp. 102~108, Tokyo, 1998.
- [6] 김희국의 5인, "철선을 이용한 표면 제시 시스템의 구현" 제어 자동화 시스템 공학회지 제6권 제 6호 2000. 6
- [7] 이정훈의 4인, "전자식 흡인력 방식의 촉각 제한 장치" PRO. of the 12th, KACC. 1997. 10
- [8] J. Vander, H. Sherman, S. Luciano "Human Physiology" 6th edition, McGraw-Hill, 1994
- [9] 김영동의 2인, "초음파 모터를 이용한 힘 반영 촉각장치", 조명·전기설비학회논문지 13권 1호 1999년 2월
- [10] 김 영동, 오금곤 : "초음파 모터의 위상차 제어" 조명·전기설비학회지, 66-74, 1996,