JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 20, No. 8, pp. 1671-1677, Aug. 2019

스마트 물질 기반 햅틱 버튼 개발

김 태 훈 · 윤 인 호 · 이 혜 선 · 김 상 연*
한국기술교육대학교 인터랙션 연구실 창의융합공학협동과정

Development of a Haptic Button based on Smart Material

Tae-Hoon Kim · In-Ho Yun · Hye-Sun Lee · Sang-Youn Kim*

Interdisciplinary Program in Creative Engineering, Interaction Laboratory of Advanced Technology Research Center, Korea University of Technology and Education, Cheonan 31253, Korea

[요 약]

본 논문에서는 초소형 디바이스에 탑재가 가능하면서 근 감각을 생성할 수 있는 햅틱 버튼을 제안한다. 제안하는 햅틱 버튼은 자기장의 세기에 따라 강성이 변하는 자기유변 탄성체와 솔레노이드 코일, 버튼 커버, 버튼 하우징으로 구성된다. 본 연구에서는 제안하는 모듈의 햅틱 성능을 극대화하기 위해 자속선 시뮬레이션을 수행한다. 또한, 제안하는 햅틱 버튼이 다양한 햅틱 감각을 생성할 수 있는지 확인하기 위해 정량적 실험을 수행한다. 이 실험에서는 입력 전류를 0 mA에서 500 mA까지 100 mA 단위로 변경하면서 눌러진 깊이에 따른 버튼의 저항력을 확인한다. 실험 결과, 제안하는 햅틱 버튼의 저항력은 9.2 N에서 15.4 N까지 증가한다. 소형이면서도 전기에 의해 동작하는 특성 때문에, 제안하는 햅틱 버튼은 VR 컨트롤러, 모바일 장치, 디지털카메라, 그리고 휴대용 광학 장비 등과 같은 소형 전자제품에 쉽게 탑재될 수 있다.

[Abstract]

In this paper, we propose a haptic button, which can easily be inserted into a tiny small device and generate a kinesthetic sensation. The proposed haptic button consists of a solenoid coil, button cover, button housing and magnetorheological elastomer whose stiffness changes according to the magnetic field. To maximize the haptic performance of the proposed module, magnetic flux simulation is conducted. To investigate whether the proposed haptic button can create a variety of haptic sensations, We conduct a quantitative experiment. In this experiment, the resistive force is measured as a function of the pressed depth of the proposed button. During the experiment, the applied current is changed from 0 mA to 500 mA at 100 mA. As a result, the resistive force of the proposed haptic button increases from 9.2 N up to 15.4 N with increasing applied current from 0 mA to 500 mA. Due to its compact and electroactive characteristics, the proposed haptic module can be easily inserted into small consumer electronic devices, such as VR controllers, mobile devices, digital cameras, camcorders, and other portable optical devices.

색인어 : 가상현실, 햅틱 버튼, 자기유변 유체, 자기유변 탄성체, 근 감각

Key word : Virtual Reality, Haptic Button, Magnetorheological Fluid, Magnetorheological Elastomer, Kinesthetic Sensation

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2019.20.8.1671

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 01 July 2019; **Revised** 15 July 2019
Accepted 26 August 2019

***Corresponding Author; Sang-Youn Kim**

Tel: ※ 개인정보 표시제한
E-mail: sykim@koreatech.ac.kr

Ⅰ. 서 론

최근 들어 가상현실(VR; Virtual Reality)에 대한 관심이 높아지면서 가상현실에서 사용자의 몰입감, 실재감 및 조작감을 증가시키기 위한 연구들이 주목받고 있다[1]-[3]. 가상현실을 체험하는 동안 사용자는 HMD(Head Mounted Display), 스피커 등과 같은 시·청각 장치를 통해 가상 환경에 대한 정보를 전달 받는다. 그러나 촉각 정보 없이 시각 및 청각 정보만으로는 단단하거나 무른, 뜨겁거나 차가운 가상 환경들을 생생하게 경험하기 어려울 뿐만 아니라, 가상 환경에서 정밀한 조작이나 섬세한 작업을 하는 것도 쉽지 않다. 이러한 맥락에서 몰입감, 실재감 및 조작감을 향상시킬 수 있는 가상현실 시스템을 위한 촉각 자극 생성 기술이 활발히 연구되고 있다[4,6,7].

촉각은 크게 근 감각(역감, Kinesthetic sensation)과 피부 감각(촉감, Tactile sensation)으로 나뉜다. 근 감각은 근육을 통해 느껴지는 감각으로 물체의 부드럽고 딱딱한 정도를 파악하고, 피부 감각은 피부를 통해 느껴지는 감각으로 물체 표면의 거칠기나 온열감 등을 파악한다. 사용자에게 피부자극을 전달하기 위해 사용되는 진동모터와 같은 햅틱 액추에이터들은 가상현실 컨트롤러와 같은 휴대용기기에 사용하기에 적합하도록 소형화 및 경량화에 대한 연구개발이 다방면으로 활발히 진행된 반면[4]-[7], 운동 반력을 넘어서는 충분한 근 감각 피드백을 생성할 수 있는 촉각 제시 장치들은 상대적으로 소형화 및 경량화에 있어 어려움을 겪고 있다.

근 감각을 생성하기 위한 초기 연구들에서는 주로 DC/AC 모터를 사용하였다[8]-[11]. 예를 들어, Afzal 등은 BLDC 모터(Brushless DC motor)를 사용하여 사용자에게 근 감각 피드백을 제공하기 위한 RW(reaction wheel) 기반 착용형 기기를 개발하였다[8]. Bianchi 등은 두 개의 DC 모터를 사용하여 사용자가 디스플레이 화면을 누를 때 근 감각 피드백을 제공할 수 있는 착용형 디스플레이를 제안하였다[9]. Price 등은 DC 모터를 사용하여 2-자유도의 근 감각을 제공할 수 있는 마우스 타입 햅틱 인터페이스를 제안하였다[10]. Murer 등은 DC 모터를 사용하여 사용자가 화면을 터치할 때 근 감각 피드백을 제공받을 수 있는 햅틱 시스템을 개발하였다[11]. 그러나 DC/AC 모터를 사용하여 사용자에게 근 감각을 제공하는 방식의 경우, 크기가 크고 무거우며 전력 소비량 또한 높기 때문에 사용자가 직접 들고 조작하는 휴대용 기기에 적용하는 것은 한계가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 자기유변 유체(MR fluid; magnetorheological fluid)라는 스마트 물질이 활발히 연구되고 있다. 자기유변 유체는 자기장을 인가하지 않았을 때는 액체 상태로 존재하지만, 자기장을 인가하게 되면 강성이 높아져 고체 상태로 바뀌는 특성이 있다[12]. 자기유변 유체를 이용한 햅틱 모듈은 소형화 및 경량화하여 제작 가능하고 사용자에게 충분한 근 감각 피드백을 줄 수 있어 가상현실 컨트롤러와 같은 휴대용 기기에 적용할 수 있다[13]-[15]. Ishizuka 등은 자기유변 유체를 이용한 소형 근 감각 제시 장치를 개발했으며[13], Li 등은 사용자에게 근 감각 피드백을 제공할 수 있는 회전 타입 소형 햅틱 액추에이터를 개발했다[14]. Yang 등은 소형 전자제품에서 사용자에게 근 감각 피드백을 제공할 수 있는 자기유변 유체 기반 햅틱 액추에이터를 개발했다[15].

그러나 자기유변 유체를 사용한 햅틱 모듈들은 몇 가지 제한점을 가지고 있다. 첫째, 자기유변 유체 기반 햅틱 모듈은 오래 사용하게 되면 유체 상태로 존재하는 철 입자들이 바닥면으로 침전하게 된다. 이로 인하여 햅틱 모듈의 성능이 철 입자의 침전여부나 정도에 따라 달라질 수 있다. 둘째, 자기유변 유체가 햅틱 모듈의 하우징 외부로 흘러내리지 않도록 차단해야 하는 문제점을 가지고 있다. 마지막으로, 자기유변 유체를 사용한 조작부에는 조작에 따른 반발력이나 복원력을 사용자에게 주기 위하여 스프링과 같은 복원 모듈을 별도로 추가해주어야 한다. 아래 표 1은 기존에 연구되었던 근 감각 액추에이터의 특징과 장단점을 요약한 것이다.

본 연구에서는 선행연구들의 단점을 보완하면서도 전력 효율이 좋고 소형화 및 경량화를 통해 휴대용 장치에 사용이 가능하며 근 감각 피드백을 생성할 수 있는 자기유변 탄성체(MRE; magnetorheological elastomer) 기반 햅틱 버튼을 제안한다. 이를 위해 본 연구에서는 햅틱 버튼의 구조를 설계하고, 햅틱 버튼 자속선 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 햅틱 버튼을 제작하고 제작된 햅틱 버튼의 성능을 정량적 실험을 통해 확인한다.

표 1. 근 감각 액추에이터 관련 선행연구 요약
Table 1. Summary of previous studies related to kinesthetic actuator

Previous studies	Using material	Advantage	Weakness
Kinesthetic actuator [8]	Brushless DC motor	- deliver kinesthetic cues	- high power consumption - big size - high weight
Miniature Stiffness Tunable actuator[13]	MR fluid	- thin - flexible	- high power consumption - need to restoring modules such as spring
Haptic actuator[15]	MR fluid	- tiny size - low power consumption	- considering of MR fluid leakage - need to restoring modules such as spring

Ⅱ. 자기유변 탄성체 기반 햅틱 버튼

2-1 햅틱 버튼의 전체적인 구조

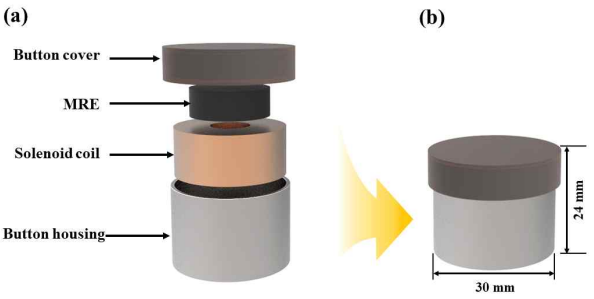

그림 1. 제안하는 햅틱 버튼의 전체적인 구조
Fig. 1. Overall structure of the proposed haptic button

그림 1은 제안하는 햅틱 버튼의 전체적인 구조를 보여준다. 그림 1.(a)와 같이 햅틱 버튼은 자속선 차폐/유도를 위한 버튼 하우징과 버튼 커버, 자기장 생성을 위한 솔레노이드 코일, 자기장에 의해 강성이 변화되는 자기유변 탄성체로 이루어져 있다. 버튼 하우징과 버튼 커버는 자성체(JIS-S43C)로 제작하여 솔레노이드 코일에서 생성되는 자기장이 햅틱 버튼 내부에서만 흐를 수 있게 유도하였고, 햅틱 버튼 외부로 자기장이 흐르지 않게 차폐시켜 자기 손실이 발생하지 않도록 설계하였다. 버튼 하우징의 바닥면에 양각 홈을 만들어 원통형으로 제작된 솔레노이드 코일을 고정하였다. 자기유변 탄성체는 솔레노이드 코일과 버튼 커버 사이에 위치시켜, 솔레노이드 코일의 자기장 인가에 따른 강성 변화가 버튼으로 전달될 수 있도록 하였다. 자기유변 탄성체의 크기는 버튼 하우징 내부 사이즈보다 작게 제작하여 제안하는 햅틱 버튼을 누를 때 자기유변 탄성체의 변형이 일어날 수 있는 충분한 공간을 확보하였다. 그림 1.(b)는 제안하는 햅틱 버튼의 결합된 그림으로 사용자가 VR 콘텐츠를 이용할 때, 촉각 피드백을 제공받기 위해 필요한 휴대용 장치인 VR 컨트롤러에 사용될 수 있다. 또한, 제안하는 햅틱 버튼은 다양한 촉각 피드백을 제공해줄 수 있는 장치에 부착 및 탑재가 용이하도록 작은 사이즈이지만 충분한 햅틱 피드백을 전달해줄 수 있는 크기(30 mm * 24 mm)로 제작되었다[16].

2-2 자기유변 탄성체의 제작 과정

그림 2는 자기유변 탄성체의 제작 과정을 보여준다. 본 연구에서 제작된 자기유변 탄성체는 실리콘 고무 주제(SR; Silicone Rubber, Ecoflex-0030 PartA)와 경화제(Ecoflex-0030 PartB), 실리콘 오일(SO; Silicone Oil, KF-96-20CS), 철가루(CIP; Carbonyl Iron Powder, BASF)로 구성된다. 제작공정을 보다 자세히 살펴보면, (1) 먼저 실리콘 고무 주제와 경화제, 실리콘 오일, 철가루를 자기유변 탄성체의 강성 변화를 높이

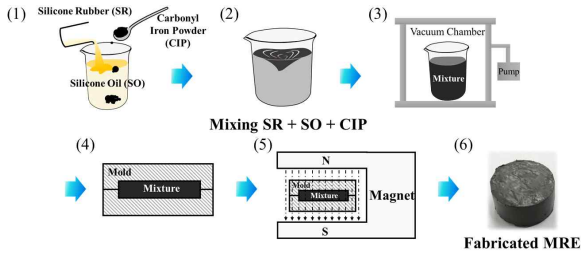

그림 2. 자기유변 탄성체 제작 과정
Fig. 2. Fabrication process of magnetorheological elastomer

기 위한 사전 실험을 통해 발견한 비율로 혼합한다. (2) 그리고 특정 부분에 덩어리가 지지 않고 완전히 섞이도록 (1)에서 만들어진 혼합물을 상온에서 약 10분간 섞어주었다. 상온에서 혼합물을 섞게 되면 혼합물 내부에 기포가 발생하게 된다. 혼합물 내부의 기포는 자기유변 탄성체를 누를 때의 강성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 자기유변 탄성체를 굳기 전에 혼합물 내부의 기포를 제거해줄 필요가 있다. (3) 따라서 혼합물을 진공 오븐에 약 5분간 넣어주어 혼합물 내부에 생성된 기포를 제거하였다. 제안하는 햅틱 버튼에 필요한 자기유변 탄성체의 사이즈는 버튼 하우징의 사이즈를 고려하여 보다 작게 제작하였다. 또한, 본 연구에서는 자기유변 탄성체를 원하는 형상으로 제작하기 위한 몰드를 사전에 설계하여 제작하였다. (4) 그리고 제작된 몰드를 사용하여 혼합물을 몰드에 부어주었다. 자기유변 탄성체의 경화과정에서 주의 점은 자기유변 탄성체 내부에 철가루 배열을 균일하게 하는 것인데, 철가루 배열이 균일하지 않다면 철가루가 특정 부분에 밀집되어 자기포화가 발생할 수 있기 때문이다. (5) 자기포화 현상을 방지하기 위해 몰드를 자기장의 양극과 음극 사이에 두어 경화과정에서 철가루 배열이 균일해지도록 하였다. (6) 마지막으로 혼합물을 상온에서 24시간 동안 경화시켜주어 자기유변 탄성체를 특정 형상으로 경화하였고, 경화과정을 통해 제작된 지름 20 mm 및 높이 7 mm의 자기유변 탄성체를 제안하는 햅틱 버튼에 사용하였다.

2-3 자기유변 탄성체의 특성

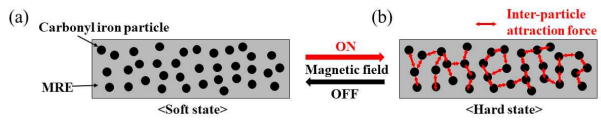

그림 3. 자기 유변 탄성체의 동작 특성
Fig. 3. Characteristic of magnetorheological elastomer

그림 3과 같이 자기유변 탄성체 내부에는 철 입자들이 균일하게 분포되어 있다. 그림 3.(a)와 같이 자기유변 탄성체에 자기장을 인가하지 않았을 때는 철 입자들 사이에 아무런 반응도 일어나지 않기 때문에 자기장을 인가한 상태보다 낮은

강성을 유지한다. 하지만, 그림 3.(b)와 같이 자기유변 탄성체에 자기장을 인가하면, 자기유변 탄성체 내부의 철 입자들 사이에 인력이 발생하게 된다. 철 입자들 사이의 인력으로 인해 자기유변 탄성체는 자기장 인가 전보다 상대적으로 더 높은 강성을 갖게 된다.

2-4 햅틱 버튼의 구동 원리

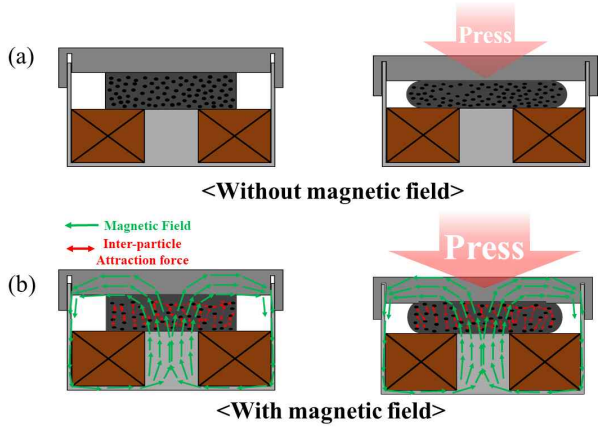

그림 4. 제안하는 햅틱 버튼의 구동 원리 (a) 자기장이 생성되지 않았을 때 (b) 자기장이 생성되었을 때
Fig. 4. Operating principle of the proposed haptic button (a) Without magnetic field (b) With magnetic field

그림 4는 제안하는 햅틱 버튼의 구동 원리를 보여준다. 그림 4.(a)와 같이 자기장이 인가되지 않았을 때는 낮은 강성을 갖는 자기유변 탄성체로 인해 사용자는 햅틱 버튼을 누르거나 조작할 때 약한 저항력을 전달받는다. 그림 4.(b)와 같이 제안하는 햅틱 버튼에 전압을 인가하게 되면 솔레노이드 코일을 통해 자기장이 생성되고, 햅틱 버튼 내부에서 흐르는 자기장으로 인해 그림 4.(a)보다 자기유변 탄성체의 강성이 더 높아지게 된다. 사용자는 자기장이 생성되었을 때와 자기장이 생성되지 않았을 때 두 가지 경우에 대해 제안하는 햅틱 버튼을 동일 깊이를 누르기 위해서는 자기장이 생성된 경우(그림 4.(b))가 자기장이 생성되지 않은 경우(그림 4.(a))보다 더 큰 힘을 가해야 한다. 다시 말해서, 사용자가 제안하는 버튼을 누를 때, 자기장의 인가 여부에 따라 저항력의 차이를 느낄 수 있게 된다.

2-5 자속선 시뮬레이션

앞서 설명한 바와 같이 제안하는 햅틱 버튼에서 자기유변 탄성체의 강성은 자기장 인가 여부에 따라 달라진다. 따라서 제안하는 햅틱 버튼에 자기장이 인가되었을 때, 자속선이 자기유변 탄성체를 통해 원활하게 흐르는지, 자속선 누설로 인한 자기 손실이 발생하지 않는지 확인할 필요가 있다.

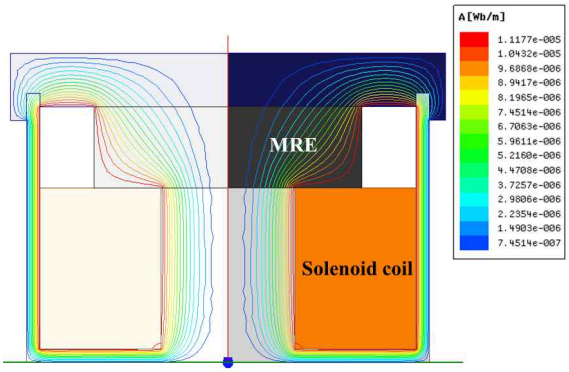

그림 5. 제안하는 햅틱 버튼의 자속선 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation result of the magnetic flux path of the proposed haptic button

본 연구에서는 제안하는 햅틱 버튼 구조가 자기장이 내부에 잘 차폐되어 외부로 자속선이 누설되지 않는지, 자속선이 자기유변 탄성체를 통과하여 원활하게 흐르는지, 특정 구간에서 자기 포화가 발생하지 않는지를 확인하기 위해 maxwell 자기 분석 프로그램을 사용하여 자속선 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5는 제안하는 햅틱 버튼의 자속선 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과를 통해, 솔레노이드 코일에 전압을 인가하여 자기장이 생성되었을 때 자속선이 자기유변 탄성체를 통해 원활하게 흐르는 것을 확인하였다. 또한 제안하는 햅틱 버튼의 커버 및 하우징이 자속선을 완전히 차폐시켜 외부로 자속선이 누설되지 않고, 어떤 구간에서도 자기 포화가 발생하지 않음을 확인했다.

Ⅲ. 햅틱 버튼 성능 평가

3-1 실험 환경

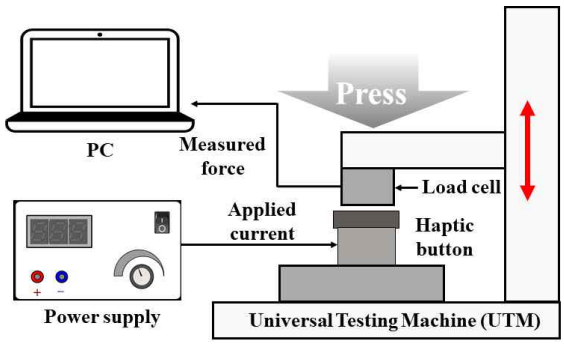

그림 6. 입력 전류에 따른 저항력 측정을 위한 실험 환경
Fig. 6. Experimental environment for resistive force measurement according to applied current

그림 6은 입력 전류에 따른 저항력을 측정하기 위한 실험

환경을 보여준다. 실험 환경은 파워 서플라이(RDP-305AU), 제안하는 햅틱 버튼, 만능재료시험기(UTM; Universal testing machine, Zwick/Roell), 로드셀(Load cell, Type Xforce P) 및 PC로 구성되어 있다. 파워 서플라이는 햅틱 버튼에 전류를 0~500 mA까지 100 mA 단위로 인가하는 역할을 하고, 만능재료시험기는 제안하는 햅틱 버튼에 전류가 100 mA 단위로 인가되었을 때, 햅틱 버튼을 동일한 힘과 속도(0.1 mm/s)로 위에서 아랫방향으로 눌러주는 역할을 한다. 만능재료시험기에 부착되어 있는 로드셀은 눌러진 깊이에 따라 햅틱 버튼에 발생하는 저항력을 측정한다. 이때 로드셀을 사용하여 눌러진 깊이에 따른 저항력을 전류의 양을 변화시키면서 반복 측정하였으며, 이 데이터를 PC로 전송하여 분석하였다.

3-2 실험 결과

그림 7은 햅틱 버튼의 눌러진 깊이에 따른 저항력의 실험 결과를 보여준다. 그래프의 x축은 햅틱 버튼의 눌러진 깊이(mm)를 나타내며, y축은 측정된 저항력(N)을 나타낸다. 실험 결과를 분석하기 위해 힘 차이식역(JND; Just Noticeable Difference)에 대해서 알아야 한다. 연구 결과에 따르면 사람은 0.5 N 이하에서는 힘 차이식역이 약 25% 이내이며 0.5 N ~ 200 N 사이에서는 힘 차이식역이 약 10% 이내이다[17].

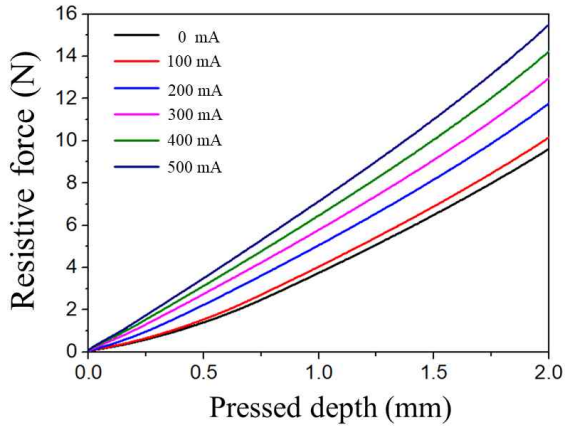

그림 7. 제안하는 햅틱 버튼의 실험 결과 : 눌러진 깊이 vs 저항력
Fig. 7. Experimental result of the proposed haptic button : Pressed depth vs. Resistive force

버튼이 1 mm 만큼 눌러졌을 때, 0 mA의 입력 전류에서는 약 3.7 N의 저항력이 생성되었고, 500 mA의 입력 전류에서는 약 7.6 N의 저항력이 생성되었다. 이는 약 7단계의 근 감각 피드백을 생성할 수 있음을 나타낸다. 버튼이 2 mm 만큼 눌러졌을 때, 0 mA의 입력 전류에서는 약 9.2 N의 저항력이 생성되었고, 500 mA의 입력 전류에서는 약 15.4 N의 저항력이 생성되었다. 이는 약 6단계의 근 감각 피드백을 생성할 수 있음을 나타낸다. 따라서 제안하는 햅틱 버튼을 누를 때, 햅틱 버튼에 인가되는 전류량 또는 누르는 깊이에 따라 다양한 저항력을 느낄 수 있다는 것을 보여주었다[17]. 실험 결과를 통해 본 연구에서는 버튼을 누를 때 다양한 근 감각 피드백을 생성할 수 있음을 보여준다.

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 VR 컨트롤러와 같은 소형 디바이스에 사용이 가능하며 다양한 근 감각을 생성하는 스마트 물질 기반 햅틱 버튼을 개발하였다. 본 연구에서 제안하는 햅틱 버튼의 자기누설 여부, 폐회로 형성 등을 확인하기 위해 자속 시뮬레이션을 진행하였고, 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 햅틱 버튼을 제작하였다. 실험을 통해 제작된 햅틱 버튼을 정량적으로 평가하였고 제안하는 햅틱 버튼이 다양한 근 감각을 생성하는 것을 확인하였다.

제안하는 햅틱 버튼은 작은 사이즈로 제작되어 VR 컨트롤러, 모바일 장치, 디지털 카메라, 휴대용 광학 장치와 같은 다양한 휴대용 기기에 사용될 수 있을 것으로 기대되며, 특히 VR과 AR 기술들에 접목되어 콘텐츠를 이용하는 사용자에게 몰입감, 실재감 그리고 만족감을 높여줄 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2018R1A6A1A03025526). 또한, 본 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술평가원(KEIT) 연구비 지원과 [10077367] 한국기술교육대학교 산학협력단 공용장비센터의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

[1] M. Slater, V. Linakis, M. Usoh, and R. Kooper, “Immersion, presence and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess,” *In Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 163-172, July 1996.

[2] P. L. Anderson, B. O. Rothbaum, and L. Hodges, “Virtual reality: Using the virtual world to improve quality of life in the real world,” *Bulletin of the Menninger Clinic*, Vol. 65, No. 1, pp. 78-91, 2001.

[3] A. B. Craig, W. R. Sherman, and J. D. Will, *Developing virtual reality applications: Foundations of effective design,* Morgan Kaufmann Pub., ch. 1, pp. 1-32, 2009.

[4] E. D. Ragan, A. Sowndararajan, R. Kopper, and D. A.

Bowman, “The effects of higher levels of immersion on procedure memorization performance and implications for educational virtual environments,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 19, No. 6, pp. 527-543, 2010.

[5] J. Gaspar, M. Fontul, E. Henriques, and A. Silva, “Haptics of in-car radio buttons and its relationship with engineering parameters,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 59, pp. 29-45, May 2017.

[6] S. M. Botden, F. Torab, S. N. Buzink, and J. J. Jakimowicz, “The importance of haptic feedback in laparoscopic suturing training and the additive value of virtual reality simulation”, *Surgical endoscopy*, Vol. 22, No. 5, pp. 1214-1222, 2008.

[7] C. Våpenstad, E. F. Hofstad, T. Langø, R. Mårvik and M. K. Chmarra, “Perceiving haptic feedback in virtual reality simulators,” *Surgical endoscopy*, Vol. 27, No. 7, pp. 2391-2397, 2013.

[8] M. R. Afzal, E. P. Carlos, and J. Yoon, “Development of a wearable device based on reaction wheels to deliver kinesthetic cues for balance training,” *In Control, Automation and Systems (ICCAS),* pp. 1926-1929, December 2017.

[9] M. Bianchi, E. Battaglia, M. Poggiani, S. Coitti, and A. Bicchi, “A Wearable Fabric-based Display for Haptic Multi-Cue Delivery,” *In Haptics Symposium(HAPTICS) IEEE*, pp. 277-283, April 2016.

[10] M. Price, and F. C. Sup, “A robotic touchscreen totem for two-dimensional haptic force display,” *In Haptics Symposium (HAPTICS) IEEE*, pp. 72-77, May 2016.

[11] M. Murer, B. Maurer, H. Huber, I. Aslan, and M. Tscheligi, “Torquescreen: Actuated flywheels for ungrounded kinaesthetic feedback in hanheld devices,” *In Proceeding of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction,* New York: NY, pp. 161-164, 2015.

[12] O. Ashour, C. A. Rogers, and W. Kordonsky, “Magnetorheological fluids: materials, characterization, and devices,” *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 7, No. 2, pp. 123-130, 1996.

[13] H. Ishizuka, T. Nakadegawa, and N. Miki, “Miniature stiffness tunable device with magnetorheological fluid,” *In Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IACC) IEEE*, pp. 409-412, May 2015.

[14] W. H. Li, H. Du, N. Q. Guo, and P. B. Kosasih, “Magnetorheological fluids based haptic device,” *Sensor Review*, Vol. 24, No. 1, pp. 68-73, 2004.

[15] T. H. Yang, J. H. Koo, S. Y. Kim, K. U. Kyung, and D. S. Kwon, “Application of magnetorheological fluids for a miniature haptic button: Experimental evaluation,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures,* Vol. 23, No. 9, pp. 1025-1031, June 2012.

[16] M. Choe, Y. Choi, J. Park, and H. K. Kim, “Comparison of Gaze Cursor Input Methods for Virtual Reality Devices,” *International Journal of Human–Computer Interaction*, Vol. 35, No. 7, pp. 620-629, June 2019.

[17] L. A. Jones, “Kinesthetic sensing, human and machine haptics,” *In Proceedings of Workshop on Human and Machine Haptics,* MA: MIT Press, pp. 1-10, 2000.

김태훈(Tae-Hoon Kim)

2019년 : 한국기술교육대학교 공학사
2019년~현재 : 한국기술교육대학교 대학원 (석박사 통합)

※관심분야: 햅틱스, 액츄에이터, 가상현실

윤인호(In-Ho Yun)

2012년 : 한국기술교육대학교 공학사
2012년~현재 : 한국기술교육대학교 대학원 (석박사 통합)

※관심분야: 햅틱스, 액츄에이터, 가상현실

이혜선(Hye-Sun Lee)

2011년 : 숙명여자대학교 대학원 (교육학석사)
2018년 : 숙명여자대학교 대학원 (교육학박사-평생교육·교육공학)
2018년~현재 : 한국기술교육대학교 첨단기술연구소 박사후연구원

※관심분야: 가상훈련, 사용자평가, 학습경험

김상연(Sang-Youn Kim)

1997년 : KAIST 대학원 (공학석사)
2004년 : KAIST (Ph.D-기계공학)
2004년~2006년 : 삼성종합기술원 책임연구원
2006년~현재 : 한국기술교육대학교 컴퓨터 공학부 교수

※관심분야 : 가상현실, 햅틱스, 센서/액츄에이터