

E-Prime에 기반한 손가락 촉각 자극기의 개발*

Development of a Finger Tactile Stimulator Based on E-Prime Software

김형식** · 민윤기*** · 김보성**** · 민병찬***** · 양재웅** · 이수정**

최미현** · 이정 한** · 탁계레** · 이봉수** · 전재훈** · 정순철**†

Hyung-Sik Kim** · Yoon-Ki Min*** · Bo-Seong Kim**** · Byung-Chan Min***** · Jae-Woong Yang** · Su-Jeong Lee**

Mi-Hyun Choi** · Jeong-Han Yi** · Gye-Rae Tack** · Bongsoo Lee** · Jae-Hoon Jun** · Soon-Cheol Chung**†

건국대학교 의공학부 의공학실용기술연구소**

Department of Biomedical Engineering, Research Institute of Biomedical Engineering,
College of Biomedical & Health, Konkuk University**

충남대학교 심리학과***

Department of Psychology, Chungnam National University***

공주대학교 그린홈에너지기술연구소****

Green Home Energy Technology Research Center, Kongju National University****

한밭대학교 산업경영공학과*****

Department of Industrial & Management Engineering, Hanbat National University*****

Abstract

In this study, a tactile stimulator was developed to resolve some problems from the previous version of the system such as system configuration, inappropriate stimulation control and additional problems. The developed tactile stimulator consists of control unit, drive unit and vibrator unit. The control unit was controlled by E-Prime software to generate appropriate vibration pulses. The drive unit supplies enough energy to the vibrator to generate effective stimulation pulses. The vibrator unit consists of small coin type vibrator and velcro, and was made to be attached at the hand easily. The developed tactile stimulator was designed by small-size, light-weight, low-power, simple-fabrication, max 35 channels and little delay time from instruction signal of E-Prime software to vibrator. The duration and magnitude of stimulation was controlled by 10 grades and the problems concerning stimulation control were compensated by wideband frequency ranges. Additionally, the electrical safety was ensured by low voltage operation. Vibrator was made to be attached on finger as well as on any part of the subject. Since this tactile stimulator is developed based on E-Prime software which is widely used in cognitive science, it is believed that this stimulator be suitable for the wide application of cognitive science study.

Keywords : finger stimulator, tactile stimulator, vibration, E-Primechanges

* 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0084784)

† 교신저자 : 정순철(건국대학교 의료생명대학 의공학부, 의공학실용기술연구소)

E-mail : scchung@kku.ac.kr

TEL : 043-840-3759

FAX : 043-851-0620

요 약

본 연구에서는 선행 연구에서 개발된 촉각 자극 시스템의 시스템적인 문제, 자극 제어에 관한 문제, 기타 부가적인 문제들을 보완할 수 있는 촉각 자극기를 개발하였다. 개발된 장치는 제어부(control unit), 구동부(drive unit), 진동부(vibrator)의 세부분으로 구성된다. 제어부는 E-Prime 소프트웨어로부터 명령을 전송받고 진동 자극 신호를 발생한다. 구동부는 촉각 자극기가 효과적으로 진동 자극을 발생할 수 있도록 충분한 전류를 공급한다. 진동부는 작은 동전(coin)형 진동기(vibrator)와 벨크로(velcro)로 구성되며 피험자의 손에 쉽게 고정할 수 있도록 제작하였다. 개발된 장치는 소형, 경량, 저전력 구동, 간단한 구조, 최대 35개의 자극 채널, 시각 및 청각과의 다양한 자극 조합을 지연시간 없이 제시할 수 있도록 설계 되어 시스템적인 문제들을 보완하였다. 자극의 크기와 시간을 10단계로 조절할 수 있도록 하고, 넓은 동작주파수 범위를 확보하여 자극 제어에 관한 문제들을 보완하였다. 저전압 구동으로 인체에 대한 안정성을 확보하고, 손가락 이외에 신체의 어느 부분이나 자극 제시가 가능하도록 제작하였다. 특히 본 시스템은 인지과학 연구에서 범용으로 사용되는 소프트웨어인 E-Prime을 기반으로 개발되었기 때문에 활용성이 매우 높을 것으로 판단된다.

주제어 : 손가락 자극기, 촉각 자극기, 진동, E-Prime

1. 서론

촉각은 어떤 물체를 만지거나 문지를 때 나타나는 감각이다. 이 감각을 통하여 사물에 대한 가장 기본적인 정보를 획득하고 판단할 수 있다. 촉각 자극은 인체의 각종 감각기와 두뇌와의 신경회로에 대한 연구, 인지 장애와 발달의 검사와 치료, 인간과 컴퓨터를 연결한 재활 또는 의사전달 등의 목적으로 연구가 수행되고 있다.

현재 촉각과 관련된 연구 분야는 기능적 자기공명 영상장치(function Magnetic Resonance Imaging : fMRI)를 이용한 두뇌 활성영역을 연구하는 뇌 및 인지과학 분야(Allen et al., 2009; Dresel et al., 2008; Graham et al., 2001; Harrington et al., 2000; Ingeholm et al., 2006; Jousmaki et al., 2007), 인간의 행동을 과학적으로 탐구하는 인간공학 분야(Auvray et al., 2008; Frings et al., 2008; Gallace et al., 2007; Ho et al., 2007a; Ho et al., 2009b; Kim et al., 2007), 가상현실구현을 위한 인간과 컴퓨터의 상호 작용을 연구하는 인간 컴퓨터 인터페이스의 제어융합기술 분야(Chatterjee et al., 2007; Kim et al., 2007; Stetten et al., 2007), 재활치료 분야(Chatterjee et al., 2007; Hijmans et al., 2007; Zivotofsky et al., 2007) 등이 있다. 이러한 다양한 연구가 효과적으로 수행되기 위해서는 정량적인 촉각 자극기 개발이 필수적이다.

Kyung(2004)은 촉각 자극을 위해 일반적으로 기계적인 방법, 전기적인 방법 그리고 열을 이용한 방법을

사용하였다. 기계적인 방법으로는 도선을 나선형으로 감은 코일을 이용하여 진동을 발생시키는 방법(Auvray et al., 2008; Chatterjee et al., 2007; Frings et al., 2008; Gallace et al., 2007; Graham et al., 2001; Hijmans et al., 2007; Ho et al., 2007a; Ho et al., 2009b; Khoudja et al., 2004; Pawluk et al., 1998; Tannan et al., 2007), 진동 모터를 이용하는 방법(Drewing et al., 2005; Sarakoglou et al., 2005; Stetten et al., 2007; Wagner et al., 2002), 압전소자를 이용하는 방법(Han et al., 2000; Harrington et al., 2000; Hayward et al., 2000; Kim et al., 2007; Kyung et al., 2004; Maucher et al., 2001; Summers et al., 2002) 등이 있다. Pawluk et al.(1998)은 전자기현상을 이용하여 촉각 자극 제시용 코일을 개발 하였으나 시스템이 매우 크고, 복잡하고, 고가였다. Khoudja et al.(2004) 등은 이러한 단점을 보완하여 소형이고, 저가인 시스템을 개발하였으나 자극의 세기를 조절할 수 없었으며 자극의 세기도 작았다. Auvray et al.(2008), Frings et al.(2008), Ho et al.(2007a, 2009b), Gallace et al.(2007) 은 코일을 이용하여 관성을 발생시키는 자극기인 VBW32(Audiological Engineering Corp, USA)를 이용하여 변화맹(주의맹, change blindness)에 관한 연구, 주의력과 행동제어, 머리의 위치에 따른 촉각 자극 반응, 촉각 자극과 단기 기억에 대한 연구를 수행 하였다. 그러나 청각-촉각의 동시자극을 제시할 경우에는 스피커로부터 출력되는 음성신호를 이용하여 촉각 자극기가 동작되도록 구성되어 자극 제시 시점에서 시간적인 차이가 발생하고

일관성 확보가 어렵다는 단점이 있었다. 또한 전력소모가 상대적으로 커 장시간 사용이 어렵다고 보고하였다. Graham et al.(2001)도 코일과 솔(brush)을 결합하여 손가락 촉각 자극기를 개발하였고 이를 기능적 자기공명영상장치(fMRI)내에서의 자극기로 이용하였다. 그러나 자극기의 크기가 크고 자기공명영상장치 내에서 자기장의 방향성 때문에 코일의 위치에 따라 자극 세기가 변하였다. Stetten et al.(2007)은 소형 진동모터를 사용하여 손가락 촉각 장치를 개발하였으나 진동의 크기와 주파수를 제어하지 못하여 활용성이 떨어졌다. Wagner et al.(2002)은 RC 서보모터를 이용하여 수직 촉각자극을 제시할 수 있는 장치를 개발하였으나 구조가 복잡하고 크며 사용 가능 주파수 영역도 25Hz미만으로 작았다. Drewing et al.(2005)도 서보모터를 이용하여 2자유도(DOF)를 가지는 시스템을 개발하였으나 시스템이 크고 구조가 복잡하고, 채널이 4개로 제한 되어 있었다. Sarakoglou et al.(2005)은 DC모터를 이용하여 시스템의 구조를 간단하게 개선하고 작고 가볍게 제작하여 이동성이 있었고 진동의 크기도 컸으나 주파수영역이 10Hz 미만으로 작았다. Harrington et al.(2000)의 연구에서는 압전소자(piezoelectric)를 이용한 진동 자극기를 개발하였으나 진동의 크기가 작고 부착이 용이하지 않았고 주파수에 따라 진동의 크기가 변하였다. Han et al.(2000)의 연구에서는 압전소자를 이용하는 방법이 국소적인 부위에 대한 자극에 유리하고 입력신호와 출력(elongation)의 조절에는 매우 좋지만 자극이 선형적이지 않고 자기 이력 현상(hysteresis)이 나타난다고 보고하였다. Ingeholm et al.(2006)은 압전소자를 사용한 자극기에 대한 단점을 보완하였으나 개발된 장치의 크기가 많이 커지게 되었다. 압전소자를 이용한 촉각 자극기는 진동 발생을 위하여 60~200V 이상의 고전압을 이용하기 때문에 인체에 위험하고, 제작하기가 어렵다는 공통적인 단점이 있었다(Hayward, 2000; Maucher, 2001; Summers, 2002).

전기적인 방법으로는 정전기(electrostatic)현상과 전기자극(electrical stimulation)을 이용하는 방법이 있다(Beebe, 1995; Jungmann, 2002; Kaczmarek, 1997; Poletto, 1997). Beebe et al.(1995)과 Jungmann et al.(2002)은 전극을 커패시터(capacitor) 형태로 구성하여 손가락 끝에 착용할 수 있을 정도로 가볍게 제작하였고, 수직 자극과 수평(shear)자극을 함께 제시할 수 있는 장치를 개발하였다. 그러나 장치 동작을 위해 100~1,000V의

고전압을 사용하고 특히 손에 땀과 같은 습기가 있으면 자극의 세기가 변하는 단점을 가지고 있었다. Poletto et al.(1997)은 전기자극을 이용하여 작은 전극으로 촉각 자극을 제시 하였으나, 이는 피험자에게 자극에 대한 불편함과 통증을 유발하여 효과적으로 촉각자극을 줄 수 없다고 보고하였다(Kim et al., 2007). Kaczmarek et al.(1997)의 연구에서도 전기 자극을 이용하여 간단하게 촉각자극을 제시할 수 있는 시스템을 개발하였으나 피험자에게 통증을 유발하고 특히 피험자가 빨리 자극에 적응한다고 보고하였다.

Ino et al.(1993)은 펠티어 현상(열전 현상, peltier effect)을 이용하여 열로서 촉각자극을 제시할 수 있는 시스템을 개발하였다. 구조가 매우 간단하였으나 자극 채널이 1개이며, 정확한 자극 시간에 대한 변인은 통제하기가 어렵다고 보고하였다. Velazquez et al.(2006)은 형상기억합금(shape memory alloy)을 이용하여 온도 자극기를 64개의 채널로 구성하였으나 작은 공간에 많은 자극 채널의 구성에 따른 채널간의 열전달에 의한 문제가 있다고 보고하였다.

이 외에도 Asamura et al.(1998)은 공기압(pneumatic)을 이용하여 피부에 벌레가 기어가는 느낌과 같은 촉각을 제시하였으나 분해능이 높은 정밀한 촉감을 제시하기가 어려웠다. Dresel et al.(2008)도 자기공명영상장치 안에서 사용할 수 있는 공기압을 이용한 촉각 자극 장치를 개발하기도 하였다.

이와 같이 기존에 개발된 촉각 자극기는 자극 제시 방법에 따라 차이가 있지만 여러 단점들이 존재한다. 즉, 크기, 무게, 구조의 복잡성, 사용시간, 전력소모, 자극 채널 개수, 시각 및 청각 등과의 통합제시를 위한 다양한 기능 그리고 가격 등과 같은 시스템에 관한 문제, 자극의 크기, 주파수, 시간 통제 등과 같은 자극제어에 관한 문제 그리고 통증, 불편함, 인체에 대한 안전성 등과 같은 여러 부가적인 문제들이 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 선행 연구에서 개발된 촉각 자극 시스템의 시스템적인 문제, 자극 제어에 관한 문제, 기타 부가적인 문제들을 보완하기 위하여 시각과 청각 자극제시에 널리 사용되고 있는 E-Prime 소프트웨어(Psychology Software Tools, INC., 미국)와 동전(coin)형(LG Innotek Co., Ltd., 대한민국) 소형 진동소자를 이용한 촉각 자극 시스템을 개발 하고자 한다.

본 시스템은 소규모 연구실 수준에서도 간편성, 정량성, 안정성이 확보된 다양한 감각 및 인지 연구에 활용될 수 있을 것이다.

2. 방법

E-Prime 소프트웨어를 구동하는 PC와 촉각 자극기를 구동하는 하드웨어에 대한 전체 시스템에 대한 개략도를 그림 1에 나타내었다.

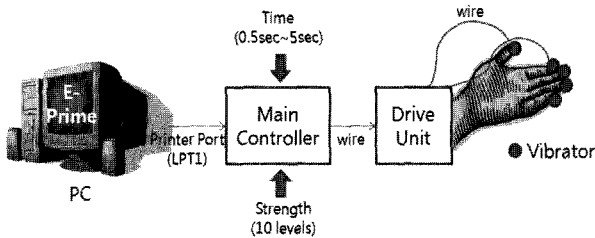


그림 1. 시스템의 전체 구성

E-Prime은 심리학, 신경과학 및 인지과학 연구에서 시각과 청각 자극 제시용으로 많이 활용되고 있는 소프트웨어이다(Auvray et al., 2008; Frings et al., 2008; Gallace et al., 2007; Ho et al., 2007a, 2009b). 간단한 소프트웨어 프로그래밍을 통하여 다양한 형태의 청각과 시각 자극을 단일 또는 복합적으로 제시할 수 있다. 시각은 다양한 사진, 텍스트 문서와 단어 색감 제시 플래쉬 영상 등을 PC 화면을 통하여 제시할 수 있으며 청각은 음악, 경적 등을 PC에 연결된 음성 장치를 통하여 제시할 수 있다. 시각 자극 제시에 대한 예를 그림 2에 나타내었다. 또한 이러한 자극 제시를 밀리초(msec)의 정확도로 임의의 순서나 미리 정해진 순서로 자극을 제시하고 결과 데이터를 기록할 수 있어 활용성이 매우 높다(Schneider et al., 2002). 제안된 촉각 자극기는 E-Prime 소프트웨어를 기반으로 동작하며 주 제어부(main controller), 구동부(drive unit), 진동부(vibrator)의 3부분으로 구성되며 피험자의 손가락에 효과적으로 진동 자극을 주도록 소형 경량으로 설계되었다.



그림 2. E-Prime을 이용한 시각자극 제시 예

2.1. 제어부

제어부는 범용 8비트 마이크로프로세서인 AVR계

열의 ATMEGA128L프로세서(Atmel, USA)를 사용하였다. 이 프로세서는 8채널 10비트의 아날로그-디지털 변환기(ADC), 2.7~5.5V의 동작전압, 8비트와 16비트 타이머 카운터 외 여러 기능을 가지고 있다. 본 연구에서는 16비트 타이머 카운터를 사용하여 Pulse Width Modulation(PWM) 신호를 발생하도록 하여 회로를 간단히 구성할 수 있어 그림 2와 같이 제어부와 구동부를 소형으로 제작할 수 있었다. 제어부와 PC는 프린터 포트(LPT1)를 이용하여 연결되며, 이를 통하여 E-Prime 소프트웨어로부터 진동 명령 신호를 받는다. 자극신호의 주파수는 진동 자극에 민감한 250Hz를 (Steven et al., 2001) 기본으로 사용하며 소프트웨어로 100Hz에서 400Hz까지 가변 할 수 있도록 구성하였다.

진동 자극 시간은 최소 0.5초부터 최대 5초까지 0.5초 단위로 변화 가능하게 하여 총 10단계로 자극 시간 조절이 가능하다. 자극강도(strength)도 10단계로 자유롭게 조절할 수 있도록 하였다. 자극 강도는 피험자가 10단계의 자극을 느낄 수 있는 상대적 강도이다. 자극 채널은 현재 5개로 손가락 다섯 개의 진동 자극이 가능하나, 연구 목적에 따라 35개까지 확장할 수 있다.



그림 3. 제어부(좌)와 구동부(우)

2.2. 구동부

그림 3과 같이 제어부로부터 받은 명령 신호로부터 진동 모터를 동작시키기 위하여 구동부를 구성하였다. 충분한 전류의 공급을 위하여 스위칭 트랜지스터(transistor)를 이용하였다. 빠른 응답시간을 가지도록, 즉 E-Prime에서 발생한 명령 신호와 최종 촉각 자극기 사이의 반응시간과의 지연시간이 최소화 되도록 회로를 구성하였다. 그림 4와 같이 구동부는 피험자의 손목위쪽에 간편하게 부착되며 벨크로(velcro)를 이용하여 쉽게 고정된다.

2.3. 진동부

피험자의 손가락에 효과적으로 촉각 자극을 주기 위하여 진동 방식을 선택하였다. 진동 발생을 위해 직경 10.5mm, 두께 2.5mm, 무게 1.4g의 작은 동전형 진동 모터를 사용하였다. 직경과 두께는 성인 일반인의 손가락 두께보다 얇고 작으며, 무게도 가벼우므로 피험자가 진동기의 무게 및 크기와 관련된 불편함을 느끼지 않도록 하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 각 진동부는 손가락 끝에 위치되도록 제작하였다. 벨크로는 빨간색, 노란색, 검은색, 초록색, 파란색의 5가지 색을 이용하여 구분할 수 있도록 하여 다른 손가락에 잘못 설치하는 것을 방지하도록 하였다. 벨크로를 이용하여 피험자의 손가락에 자극기를 위치시킴으로써 벨크로의 조임에 따라 피험자에게 전달되는 자극의 강도가 달라질 수 있으나 10단계로 조절 가능한 자극의 강도를 통하여 이를 보정할 수 있다.

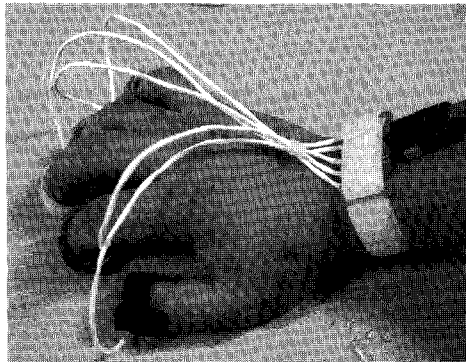


그림 4. 구동부와 진동부

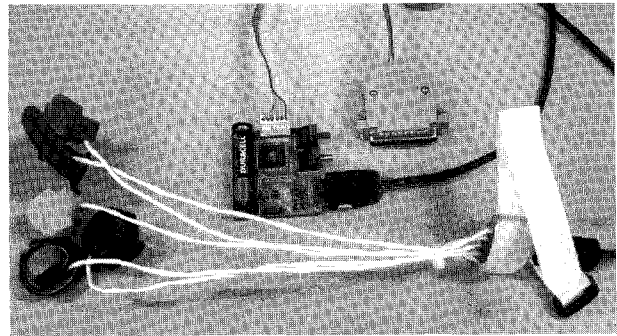


그림 5. 촉각 자극기의 완성도

E-Prime에서의 명령신호와 촉각 자극기의 반응 시간 파형을 오실로스코프로 측정 하여 그림 6에 나타내었다. 지연시간은 $25\mu s$ 이하로 E-Prime 소프트웨어 제작회사에서 제공하는 병렬포트 타이밍(timing) 시험에서의 최소 지연시간오차 $36\mu s$ 보다 적어 지연시간을 무시하고 사용이 가능하였다.

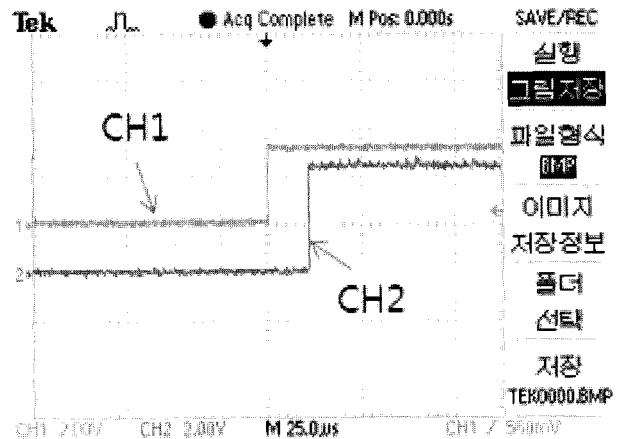


그림 6. 명령 지연시간(delay) 측정

(CH1 : E-Prime 명령신호, CH2 : 촉각 자극기 반응신호)

3. 결과

그림 5에 제작한 촉각 자극기의 완성도를 나타내었다. 전체 시스템은 1.5V의 AAA 건전지 1개로 약 90시간의 연속사용이 가능하고, 주요 회로는 승압(step-up) 회로를 이용하여 +5V의 전원전압으로 동작한다. 주 제어부의 크기는 가로 53mm, 세로 50mm, 두께 1.6mm로 피험자의 바지 주머니 등에 넣을 수 있으며 무게는 전지포함 81g으로 경량이어서 실제 실험에서 피험자에게 부착하였을 때 불편하다는 보고는 없었다.

4. 토의

본 연구에서는 기존에 개발된 촉각 자극기의 단점인 시스템에 관한 문제, 자극제어에 관한 문제 그리고 여러 부가적인 문제들을 보완하는 촉각 자극기를 개발하였다.

본 연구에서는 기존에 개발된 촉각 자극기의 단점인 시스템에 관한 문제, 자극제어에 관한 문제 그리고 여러 부가적인 문제들을 보완하는 촉각 자극기를 개발하였다.

표 1. 타 촉각 자극기와 비교

기존 자극기	크기 (mm)	자극 크기 (최대)	자극 주파수 (Hz)	진동원	무게 (g)	사용 전압 (Vdc)
P-289	D=50 H=12	0.2mm	1.1k	Piezo	56	~1000
C2 Tactor	D=30.5 H=7.9	0.64mm	200~300	coil	17	25
VBW32	L=25.4 W=18.5 H=10.7	50dB	100~800	coil	6.5	3.5
C1026B200F	D=10 H=2.6	2.2m/s ²	10~55	vibration motor	1.11	4
Proposed vibrator	D=10.5 H=2.5	4m/s ²	100~400	vibration motor	1.4	4

본 연구에서 개발된 촉각 자극기는 시스템적인 측면에서 다음과 같은 장점이 있다. 소형 경량이어서 기존의 자극 시스템에 비해 휴대가 가능하고 구조가 간단하여 피험자에게 간편하게 설치할 수 있다. 일반적으로 사용되는 저가의 부품을 사용하면서도 최적 설계와 구동 알고리즘으로 저전력 구동이 가능하다. 또한, 자극 채널 개수를 35개 까지 확장 할 수 있고, 촉각-시각, 촉각-청각, 촉각-청각-시각 등의 다양한 자극 조합을 지연시간 없이 제시할 수 있다.

자극 제어의 측면에서는 자극의 크기와 자극 시간을 10단계로 디지털 스위치를 이용하여 손쉽게 조절할 수 있도록 하였고, 동작 주파수의 범위(100~400Hz)도 넓어 활용성이 높은 장점이 있다. 부가적인 측면에서는 촉각 자극시 발생하는 통증을 진동 자극을 이용함으로써 최소화 하였으며 이와 함께 저전압(+5V)으로 동작하므로 인체에 대한 안전성을 확보하였다. 또한 대부분의 선행 연구에서는 개발된 기기와 함께 구동을 위한 전용 소프트웨어를 별도로 제작하여 사용자 user-interface가 우수하지 못하고 범용으로 사용하기에는 한계가 있다(Auvray, 2008; Frings, 2008; Gallace, 2007; Ho, 2007a; Ho, 2009b). 그러나 본 연구에서는 감각 자극 제시를 위해 가장 일반적으로 사용되는 E-Prime 소프트웨어를 기반으로 제작하였기 때문에 접근성과 활용성이 매우 높다. 또한, 고정용 벨크로의 길이를 조절하여 손가락 이외의 발가락과 같은 부분의 촉각 자극제시가 가능하고 벨크로를 이용하지 않더라도 접착테이프 등을 이용하면 신체 어느 부분이든 촉각 자극 제시가 가능하여 다양한 감각 및 인지 연구에 적극적으로 활용될 수 있을 것이다.

향후 하드웨어를 무선화하고 PC와 촉각 자극기 간

에 연결선을 제거하여 더욱 간편화된 시스템으로 개선하고자 한다.

참고문헌

- Allen, H. A., & Humpherys, G. W. (2009). Direct tactile stimulation of dorsal occipito-temporal cortex in a visual agnostic. *Current Biology*, 19, 1044-1049.
- Asamura, N., Yokoyama, N., & Shinoda, H. (1998). Selectively stimulating skin receptors for tactile display. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 32-37.
- Auvray, M., Gallace, A., O'Brien, J. H., Tan, H. Z., & Spence, C. (2008). Tactile and visual distractors induce change blindness for tactile stimuli presented on the fingertips. *Brain Research*, 1213, 111-119.
- Beebe, D. J., Hymel, C. M., Kaczmarek, K. A., & Tyler, M. E. (1995). A polyimide-on-silicon electrostatic fingertip tactile display. *Proceeding 17th International Conference IEEE/EMBS*, 1545-1546.
- Chatterjee, A., Aggarwal, V., Ramos, A., Acharya, S., & Thakor, N. V. (2007). A brain-computer interface with vibrotactile biofeedback for haptic information. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 40(4).
- Dresel, C., Parzinger, A., Rimpau, C., Zimmer, C., Ceballos-Baumann, A. O., & Haslinger, B. (2008). A new device for tactile stimulation during fMRI. *NeuroImage*, 39, 1094-1103.
- Drewing, K., Fritschi, M., Zopf, R., Ernst, M. O., & Buss, M. (2005). First evaluation of a novel tactile display exerting shear force via lateral displacement. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2, 118-131.
- Frings, C., Bader, R., & Spence, C. (2008). Selection in touch : Negative priming with tactile stimuli. *Perception & Psychophysics*, 70, 516-523.
- Gallace, A., Tan, H. Z., Haggard, P., & Spence, C. (2007). Short term memory for tactile stimuli. *Brain Research*, 1190, 132-142.
- Graham, S. J., Staines, W. R., Nelson, A., Plewes, D. B., & Mcilroy, W. E. (2001). New devices to deliver somatosensory stimuli during functional MRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, 46, 436-442.

- Han, J. M., Adriaens, T. A., de Koning, W. L., & Banning, R. (2000). Modeling piezoelectric actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5, 331-341.
- Harrington, G. S., Wright, C. T., & Ill, J. H. D. (2000). A new vibrotactile stimulator for functional MRI. *Human Brain Mapping*, 10, 140-145.
- Hayward, V., & Cruz-Hernández, J. M. (2000). Tactile display device using distributed lateral skin stretch. *Proceeding of the 8th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 1309-1314.
- Hijmans, J. M., Geertzen J. H. B., Schokker, B., & Postema, K. (2007). Development of vibrating insoles. *International Journal of Rehabilitation Research*, 30, 343-345.
- Ho, C., & Spence, C. (2007). Head orientation biases tactile localization. *Brain Research*, 1144, 236-141.
- Ho, C., Santangelo, V., & Spence, C. (2009). Multi-sensory warning signals : When spatial correspondence matters. *Experimental Brain Research*, 195, 261-272.
- Ingeholm, J. E., Dold, G. R., Pfeffer, L. E., Ide, D., Goldstein, S. R., Johnson, K. O., & Van Boven, R. W. (2006). The Helix : A multi-modal tactile stimulator for human functional neuroimaging. *Journal of Neuroscience Methods*, 155, 217-223.
- Ino, S., Shimizu, S., Odagawa, T., Sato, M., Takahashi, M., Izumi, T., & Ifukube, T. (1993). A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature of skin surface. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, 220-224.
- Jousmaki, V., Nishitani, N., & Hari, R. (2007). A brush stimulator for functional brain imaging. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2620-2624.
- Jungmann, M., & Schlaak, H. F. (2002). Miniaturized electrostatic tactile display with high structural compliance. *Proceeding of the Eurohaptics 2002 International Conference*, 12-17.
- Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., & Bach-y-Rita, P. (1997). Pattern identification on a fingertip-scanned electrotactile display. *Proceeding of 19th International Conference IEEE/EMBS*, 1694-1697.
- Khoudja, M. B., Hafez, M., Alexandre, J. M., Kheddar, A., & Moreau, V. (2004). VITAL: A VIBroTActiLe interface with thermal feedback. *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*.
- Kim, S. C., Kyung, K. U., Sohn, J. H., & Kwon, D. S. (2007). An evaluation of human sensibility on perceived texture for real haptic representation. *Journal of Korean Institute of Information Scientists and Engineers : Software and Applications*, 34, 900-909.
- Kyung, K. U., Son, S. W., & Kwon, D. S. (2004). Design of an integrated tactile display system. *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 776-781.
- Maucher, T., Meier, K., & Schemmel, J. (2001). An interactive tactile graphics display. *Sixth International Symposium on Signal Processing and its Applications*, 190-193.
- Pawluk, D. T. V., Buskirk, C. P., Killebrew, J. H., Hsiao, S. S., & Johnson, K. O. (1998). Control and pattern specification for high density tactile display. *Proceeding of the ASME Dynamic Systems and Control Division, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 97-102.
- Poletto, C. J., & Doren, C. V. (1997). A high voltage stimulator for small electrode electrocutaneous stimulation. *Proceeding of the 19th IEEE International Conference IEEE/EMBS*, 2415-2418.
- Sarakoglou, I., Tsagarakis, N., & Caldwell, D. G. (2005). A portable fingertip tactile feedback array - transmission system reliability and modelling. *Proceeding of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 547-548.
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-Prime User's Guide*. Pittsburgh: Psychology Software Tools Inc.
- Stetten, G., Klatzky, R., Nichol, B., Galeotti, J., Rockot, K., Zawrotny, K., Weiser, D., Sendgikoski, N., & Horvath, S. (2007). Fingersight : Fingertip visual haptic sensing and control. *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications*.

- Steven, A. W., & William, H. (2001). A high bandwidth interface for haptic human computer interaction. *Mechatronics, 11*, 371-387.
- Summers, I. R., & Chanter, C. M. (2002). A broadband tactile array on the fingertip. *Journal of Acoustical Society of America, 112*, 2118-2126.
- Tannan, V., Dennis, R. G., Zhang, Z., & Tommerdahl, M. (2007). A portable tactile sensory diagnostic device. *Journal of Neuroscience Methods, 164*, 131-138.
- Velazquez, R., Pissaloux, E. E., & Wiertlewski, M. (2006). A compact tactile display for the blind with shape memory alloys. *Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3905-3910.
- Wagner, C. R., Lederman, S. J., & Howe, R. D. (2002). A tactile shape display using RC servomotors. *The Tenth Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment Teleoperator Systems*, 354-356.
- Zivotofsky, A. Z., & Hausdorff, J. M. (2007). The Sensory feedback mechanism enabling couples to walk synchronously : An initial investigation, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 28*(4).

원고접수 : 10.10.05

수정접수 : 10.11.30

게재확정 : 10.12.07