

Cost-Effective Neuro-Modulation Device for Medical Imaging

Seoung-Min Hwang¹, YeongBeen Choi¹, Gyunhen Lee^{1,2}, Young-Jin Jung^{1,2,*}

¹Department of Biomedical Engineering, Chonnam National University

²School of Healthcare BioMedical Engineering, Chonnam National University

Received: December 13, 2023. Revised: December 29, 2023. Accepted: December 31, 2023.

ABSTRACT

In this study, we aimed to develop a cost-effective neuro-modulation device for use in neuroscientific and clinical medical imaging applications. To achieve this, we designed and fabricated a brain neuro-modulation device with a material cost of less than \$500, and subsequently evaluated its performance. The measured performance was found to be comparable to existing medical devices (TENS), with the developed device being compact in size, measuring less than 3 cm by 3 cm. The outcomes of this study are expected to be applicable in accelerating research and development in related fields, as well as in the rapid commercialization of neuro-modulation technology. Furthermore, it is anticipated that this work will contribute to advancements in functional radiological medical imaging technology and enhance accessibility to brain science and brain stimulation technology.

Keywords: Medical imaging, Neuromodulation, Brain Stimulation, Brain Science, tCS

I. INTRODUCTION

현대 의료영상 기술은 혁신적인 발전을 거듭하고 있으며, 다양한 진단 분야에서 질환의 판단에 있어서 결정적인 근거를 제시합니다.^[1] 특히 뇌와 신경계 질환의 진단과 치료에서 방사선 의료영상은 중요한 역할을 합니다. 이 분야의 기술발전은 뇌 기능의 더 깊은 이해와 효과적인 치료 방법의 개발을 가능하게 합니다.^[2]

고해상도 7T-자기공명영상 (7T-Magnetic Resonance Imaging, 7T-MRI)은 뇌의 구조와 기능을 매우 상세하게 이미지화시키며, 뇌 조직의 손상, 종양, 염증 등을 정밀하게 파악할 수 있도록 신경 조직의 미세한 변화까지 탐지할 수 있습니다.^[3] 또한 기능적 자기공명영상(functional-MRI, f-MRI)는 뇌의 혈류 변화를 기반으로 뇌 활동을 국지화합니다. 이 기술은 뇌의 다양한 부위가 어떻게 상호 작용하는지 이해하는 데 주요한 도구로 활용되며, 뇌 기능의 정상

적인 활동과 질병 상태의 변화를 비교 분석하는 데 주로 활용됩니다.^[4] 확산 텐서 영상(Diffusion Tensor Imaging, DTI)는 뇌 내부의 신경 섬유 경로를 시각화하여 뇌 손상, 퇴행성 뇌 질환, 뇌졸중 후의 신경 회복과정을 이해하는 데 주요 도구로 활용됩니다.^[5] 마지막으로 양전자방출단층촬영(Positron Emission Tomography, PET) 및 단일광자방출컴퓨터 단층촬영(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)는 뇌의 대사(혈류)활동을 이미지화하여 기능적 변화를 탐지하여 알츠하이머, 파킨슨 등의 퇴행성 뇌 질환을 진단하는 데 도움을 줍니다.^[5,6]

특히, 뇌의 기능적 활동을 연구하고, 특정 신경계 질환의 진단 및 치료에 도움을 줄 수 있는 뇌신경 조절(Neuromodulation) 기술은 뇌신경 영상 촬영에 함께 활용될 수 있어서, 최근에 널리 연구가 진행되고 있다. 최근 우울증 및 두통 등의 질환의 치료에 유의미한 효과를 보여서 대한민국 식품의약품

* Corresponding Author: Young-Jin Jung

E-mail: yj@jnu.ac.kr

Tel: +82-61-659-7366

안정처(Ministry of Food and Drug Safety)에 신경 자극용 의료기기로 등록이 되는 등, 신경과학 연구 및 다양한 신경계 질환의 진단과 치료에 광범위하게 활용됩니다.^[7-10]

뇌신경 조절 기술은 크게 2가지로 나뉘어진다. 그 중 현재 임상에서 널리 활용되는 뇌 자극 기술인 경두개자기자극 기술 (Transcranial Magnetic Stimulation, TMS) 은 순간적으로 강한 자기장을 환자의 두피 위에서 위치한 코일에 생성시켜 전자기 유도원리에 따른 와전류(eddy current)를 뇌에 생성시켜 신경세포를 직접적으로 자극하는 기법입니다^[11]. 두 번째 널리 활용되는 뇌신경 자극 기술은 뇌전류 자극 기술((Transcranial Current Stimulation, tCS)로, 자극을 주는 파형의 패턴에 따라서 경두개직류전류자극(transcranial direct current Stimulation, tDCS), 경두개교류전류자극(Transcranial Alternating Current Stimulation, tACS), 그리고 경두개랜덤노이즈자극(Transcranial Random Noise Stimulation, rRNS), 마지막으로 시간적간섭자극 (Temporal Interference Stimulation, TIS)로 나뉘어질 수 있습니다.^[8-12] TMS의 경우 유도 자기장을 활용하는 데 있어서, MRI와 같은 몇몇 방사선의료기기에서 활용에 제한될 수 있으나, tCS의 경우 MRI를 비롯한 다양한 뇌 영상장비와 함께 촬영이 가능한 특징을 가집니다. 그러나, TMS와 tCS등은 신경과학 연구에 있어서 필수적인 뇌 자극 기술이지만, 장비가격이 최소 수천만원의 높은 비용으로 판매되고 있어서 임상가 및 연구자들의 손쉬운 접근을 막고 있습니다.^[9-11]

이러한 접근의 제한점을 극복하고자 본 연구에서는 가성비를 확보할 수 있는 tCS 장비를 개발하고자 하였으며, 저렴한 비용으로 tCS를 구현할 수 있는 회로를 설계 및 개발하고자 하였습니다. 특히 본 연구에서는 2014년 3월 초 FDA에 승인(510(k) number: K171446)을 받은 Cefaly 사의 Transcutaneous electrical nerve stimulator, TENS)장비인^[13-16], 편두통 치료 장비를 개발하고자 하였습니다. 이는 소형이며, 휴대가 가능한 특징을 가지고 있습니다. 현재 유사 장비가 대한민국 식품의약품 안정처의 승인을 받은 상황으로, 이와 유사한 성능을 구현하기 위한 설계 연구를 진행하였습니다.

II. MATERIAL AND METHODS

본 연구에서 개발하고자 하는 기기는, 기존 TENS 장비에서 갖추는 성능을 유사하게 구현함과 동시에 저렴한 생산 비용을 갖추는 것에 초점을 맞추어 개발하였다. 이를 위해서 아래 Table 1과 같은 성능 조건을 개발에 활용하였다.

Table 1. Output specification for the TENS

Parameters	Spec.
Maximum Intensity	16 mA
pulse frequency	60, 100 Hz
Pulse width	250 us
Pulse duration	500 us
session duration	60 min
Maximum rise time (of pulse)	5 us

회로 설계를 위해 높은 전원을 생성하고자 TPS61391 (TI, USA)의 전원소자를 활용하였으며, MRI등의 영상촬영과 함께 자극이 이루어지는데 문제가 없도록 하기 위해서 플로팅전류소스(Floating Current Source) 회로를 OPA455 (TI, USA)를 이용하여 설계 하였다. 또한, 전류를 제어하기 위해서, DAC5311 (TI, USA)를 이용하여 출력 전류량을 제어하였다. DAC5311의 경우에 직렬포트통신(Serial Port Interface, SPI)를 통하여 제어되며, 이를 Fig. 1와 같이 타이밍에 맞추어 인터페이스 개발을 진행하였다.



Fig. 1. Interface waveform for SPI communication.

전체적인 시스템의 제어를 위해서 마이크로컨트롤러유닛(Micro Controller Unit, MCU)으로 휴대용 저전력 제품으로 MSP430FR2422를 사용하여 아래의 Fig. 2와 같은 제어 프로세스를 통해 시스템 소

소프트웨어(firmware)를 개발하였다.

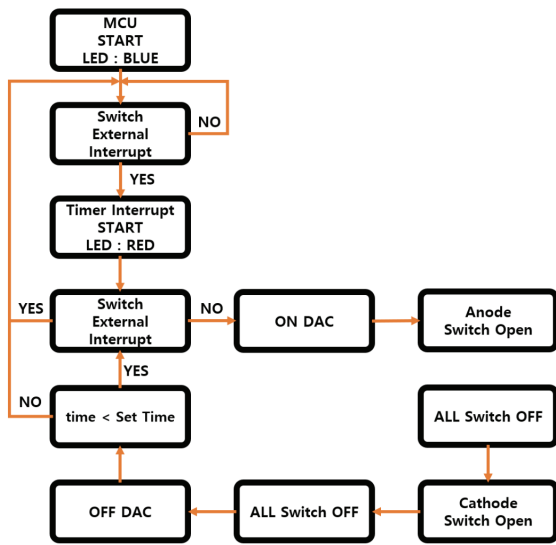


Fig. 2 Flow Char for firmware software

또한 제작된 TENS 장비의 활용도를 높이기 위해 서 휴대가 가능하도록 3cm by 3cm 이하의 크기로 PCB를 설계하였다. 제작된 PCB 설계 도면은 Fig. 3 에 나타냈으며, 이에 맞춘 휴대용 케이스는 3D Printer를 이용하여 제작하였다.

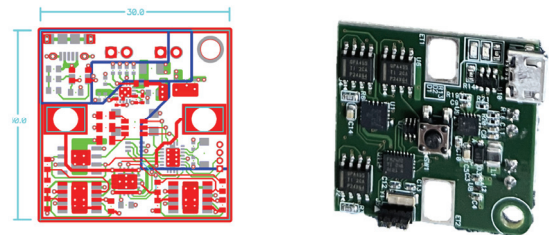
III. RESULT

본 연구를 통해서 제작된 TENS 시스템은 앞서 언급한 성능요구조건을 전반적으로 만족하는 결과를 Table 2에 표기하였다.

Table 2. End-Result Specifications

Parameters	Results
Maximum Intensity	16 mA
Pulse frequency	0~200 Hz
Pulse width	250 μ s (오차율 1%이하)
Pulse duration	500 μ s (오차율 1%이하)
Maximum rise time (of pulse)	5 μ s 이하

전반적으로 자극 전류는 최대 16 mA를 도출하였으며, 자극 주파수는 0~200 Hz까지 자극이 가능함을 Fig. 4를 통해 확인하였다. 또한 펄스폭과 펄스 간격은 각각 250 μ s 와 500 μ s를 이루고 있으며, 최대 상승 에지(rising edge) 시간은 5 μ s 이하로 확인되었다.



(A) PCB Design (B) Real image of PCB
Fig. 3 PCB images for Wearable TENS system

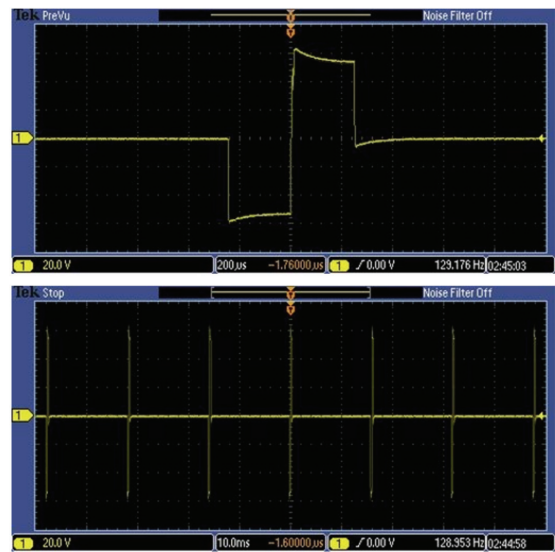


Fig. 4 Output Waveforms (Top) Zoomed Biphasic stimulation waveform, (bottom) Continuous stimulation waveform

Table 3. Development cost

Part Number	Price (\$)
MSP430FR2422	\$2
TPS61391	\$4
OPA455	\$10
DAC5311	\$3
etc.(include PCB)	\$400
Total	< \$500

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 개발된 저렴한 뇌신경조절 장비의 개발은 신경과학, 임상의학 등의 분야에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이라 기대됩니다. 이러한 기술은 기능적 방사선 의료영상 기술의 발전과

뇌과학의 접근성을 높이는데 기여할 것입니다. 특히, 기술적 접근성의 향상은 고가의 의료 장비 (MINDD STIM+, yBrain: 약 3천만원)로 인해 많은 영역에서 활용이 어려운 기술에 대한 접근성을 크게 높여줄 수 있으며, 이러한 높은 접근성은 보편적 기술 개발에 밑거름이 될 것이라 여겨집니다. 다만, 본 연구에서 측정된 가격은 연구자의 인건비 등이 빠진 순수 재료비이지만, 본 논문은 추후 더욱 저렴한 뇌신경조절 시스템 개발의 초석이 될 수 있을 것이라 여겨집니다.

본 연구 결과에서 사용 시간에 대한 평가가 이루어지지 못한 점이 존재합니다. 언급된 사용 시간의 평가는 어떠한 (용량이 다른) 배터리를 사용하는가에 대한 것에 의존하기 때문에 결과 지표에서 따로 측정하지 않았습니다. 당연한 이야기지만 용량이 큰 배터리를 사용하면 60분 이상의 성능이 유지될 수 있지만, 무게가 증가하여 사용성이 낮아집니다. 이러한 사용성을 고려하여 배터리 용량 선정 부분에 대한 적절한 제품의 요구 사항이 필요합니다.

추후, 본 연구에서 개발된 저렴한 신경조절 장비가 뇌신경조절 분야에서 다양한 연구 및 사업화용 상품 개발의 촉진제로 활용될 수 있습니다. 특히, 비용 효율적인 뇌신경조절 기기의 개발은 더 많은 연구기관과 기업들의 적극적인 투자를 유도할 수 있으며, 신경과학 및 관련 기술의 발전을 촉진할 수 있습니다.

본 연구에서는 기존 의료기기와 동등성을 갖춘 저렴한 뇌신경자극 기기를 개발 하였습니다. 장비 활용의 효율성을 극대화하기 위해서 회로를 단순화하고 제작 비용을 최소화하는 기기 설계를 연구 하였습니다. 또한, 본 연구에서 개발된 장비의 경우 약간의 수정을 통해서 tDCS 및 tACS 그리고 tRNS 등의 뇌신경자극 장비로 변경이 하드웨어의 변화 없이 손쉽게 이루어질 수 있는 점이 장점있습니다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 비용-효율적인 뇌신경조절 장비를 개발하고자 하였으며, 결과적으로 500\$ 미만의 재료비를 가지는 뇌신경조절 장비를 개발하고 성능을 평가하였습니다. 이러한 비용-효율적인 뇌신경

조절 장비는 향후 관련 분야의 연구 개발과 신경 자극 기술의 빠른 발전 및 상용화에 크게 기여할 것이라 기대합니다.

Acknowledgement

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (재단 과제 관리번호: 광주전남플랫폼 2021RIS-002)

Reference

- [1] J. S. Duncan, N. Ayache, "Medical image analysis: Progress over two decades and the challenges ahead", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 22, No. 1, pp. 85-106, 2000. <http://dx.doi.org/10.1109/34.824822>
- [2] L. W. Goldman, "Principles of CT: radiation dose and image quality", *Journal of nuclear medicine technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 213-225, 2007. <http://dx.doi.org/10.2967/jnmt.106.037846>
- [3] D. B. Plewes, W. Kucharczyk, "Physics of MRI: A primer", *Journal of magnetic resonance imaging*, Vol. 35, No. 5, pp. 1038-1054, 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/jmri.23642>
- [4] J. J. Pekar, "A brief introduction to functional MRI", *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Vol. 25, No. 2, pp. 24-26, 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/memb.2006.1607665>
- [5] D. W. Townsend, J. P. Carney, J. T. Yap, N. C. Hall, "PET/CT today and tomorrow", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 45, No. 1, pp. 4S-14S, 2004.
- [6] V. Kapoor, B. M. McCook, F. S. Torok, "An introduction to PET-CT imaging", *Radiographics*, Vol. 24, No. 2, pp. 523-543, 2004. <http://dx.doi.org/10.1148/rg.242025724>
- [7] Y. Assaf, O. Pasternak, "Diffusion tensor imaging (DTI)-based white matter mapping in brain research: a review", *Journal of Molecular Neuroscience*, Vol. 34, pp. 51-61, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s12031-007-0029-0>
- [8] M. Kubicki, H. Park, C. F. Westin, P. G. Nestor, R. V. Mulkern, S. E. Maier, M. E. Shenton, "DTI and

MTR abnormalities in schizophrenia: analysis of white matter integrity", *NeuroImage*, Vol. 26, No. 4, pp. 1109-1118, 2005.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.03.026>

- [9] G. Mariani, L. Bruselli, T. Kuwert, E. E. Kim, A. Flotats, O. Israel, N. Watanabe, "A review on the clinical uses of SPECT/CT", *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, Vol. 37, No. 10, pp. 1959-1985, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00259-010-1390-8>
- [10] M. T. Madsen, "Recent advances in SPECT imaging", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 48, No. 4, pp. 661-673, 2007.
<http://dx.doi.org/10.2967/jnumed.106.032680>
- [11] H. Matsumoto, Y. Ugawa, "Adverse events of tDCS and tACS: a review", *Clinical Neurophysiology Practice*, Vol. 2, pp. 19-25, 2017.
<https://doi.org/10.1016%2Fj.cnp.2016.12.003>
- [12] A. Flöel, "tDCS-enhanced motor and cognitive function in neurological diseases", *NeuroImage*, Vol. 85, No. 3, pp. 934-947, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.098>
- [13] W. Klomjai, R. Katz, A. Lackmy-Vallée, "Basic principles of transcranial magnetic stimulation (TMS) and repetitive TMS (rTMS)", *Annals of physical and rehabilitation medicine*, Vol. 58, No. 4, pp. 208-213, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rehab.2015.05.005>
- [14] K. A. Sluka, D. Walsh, "Transcutaneous electrical nerve stimulation: basic science mechanisms and clinical effectiveness", *Journal of Pain*, Vol. 4, No. 3, pp. 109-121, 2003.
<http://dx.doi.org/10.1054/jpai.2003.434>
- [15] I. Jones, M. I. Johnson, "Transcutaneous electrical nerve stimulation. Continuing Education in Anaesthesia", *Continuing Education in Anaesthesia, Critical Care & Pain*, Vol. 9, No. 4, pp. 130-135, 2009. <http://dx.doi.org/10.1093/bjaceaccp/mkp021>
- [16] M. Johnson, "Transcutaneous electrical nerve stimulation: mechanisms, clinical application and evidence", *Reviews in pain*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-11, 2007. <http://dx.doi.org/10.1177/204946370700100103>

의료영상 촬영을 위한 비용-효율적인 신경조절 장비

황승민¹, 최영빈¹, 이기현^{1,2}, 정영진^{1,2,*}

¹전남대학교 바이오메디컬협동과정

²전남대학교 헬스케어메디컬공학부

요약

본 연구는 신경과학과 임상의학 분야에서 의료영상 촬영에 활용될 수 있는 비용-효율적인 뇌 신경조절 장비 개발하고자 하였습니다. 이를 위해, 500달러 미만의 재료비로 뇌 신경조절 장비를 설계하고, 이를 제작하여, 그 성능을 평가하였다. 측정된 성능평가 결과는 기존 의료기기와 유사하였으며, 그 크기는 3 cm by 3 cm 이하로 개발하였다. 본 연구의 결과는 관련 분야의 연구 개발 및 신경 자극 기술의 신속한 상용화 등에 활용될 수 있을 것이라 기대됩니다. 또한 기능적 방사선 의료영상 기술의 발전 및 뇌과학 및 뇌 자극 기술 개발의 접근성 향상에 기여할 것으로 기대됩니다.

중심단어: 방사선영상, 신경조절, 뇌자극, 경두개전류자극, 뇌과학

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	황승민	전남대학교 바이오메디컬협동과정	박사과정
(공동저자)	최영빈	전남대학교 바이오메디컬협동과정	학사
	이기현	전남대학교 헬스케어메디컬공학부	조교수
(교신저자)	정영진	전남대학교 헬스케어메디컬공학부	부교수