

피부 자극 감소에 효과적인 진전 억제를 위한 전기 자극 분산 전략 탐색

유진우, 김보민, 김한준*, 최지웅
DGIST, *국립금오공과대학교

gisikbaksa@dgist.ac.kr, bmk0714@dgist.ac.kr, *hanjoonk@kumoh.ac.kr, jwchoi@dgist.ac.kr

An investigation of effective stimulus dispersion strategies mitigating cutaneous irritation during electrical stimulation-based tremor suppression

Jin-Woo Yu, Bomin Kim, Han-Joon Kim*, Ji-Woong Choi
DGIST, *Kumoh National Institute of Technology

요 약

진전은 흔한 운동 장애 중 하나로 세밀한 운동 조절을 어렵게 하여 환자의 일상생활에 부정적인 영향을 미친다. 경피 전기 자극은 비침습적으로 말초 감각 신경을 자극하여 진전을 억제할 수 있는 효과적인 방법이지만, 피부 고통을 유발하는 문제가 있다. 피부 고통의 경감을 위해 공간적 자극 분산과 시간적 자극 분산이 제시된 바 있지만, 이러한 방법을 같은 조건에서 비교한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 활용하여 두 자극 분산 방법을 평가하고 피부 자극을 효과적으로 억제할 수 있는 자극 방법을 확인한다.

I. 서 론

진전(tremor)은 주기적인 불수의적 근육 움직임의 특징으로 하는 흔한 운동 장애 중 하나이다. 진전은 세밀한 운동 수행에 많은 어려움을 초래하여 식사, 직업 수행 등 일상생활에 부정적인 영향을 미친다. 의학적으로 진전의 억제를 위해서 뇌 수술이나 약물 치료가 자주 사용된다. 그러나 뇌 수술은 큰 비용이 요구되며 비가역적 신경 손상을 유발하여 드물게 부작용을 초래할 수 있다. 약물 치료의 경우 일부의 환자에게는 충분한 개선 효과를 보이지 않는 경우가 보고되고 있다 [1].

최근의 연구에서 경피 전기 자극(TESS; transcutaneous electrical stimulation)을 사용하여 진전을 효과적으로 억제할 수 있음이 보고되었다 [1]. 그러나 TESS는 피부에 부착된 전극을 통해 말초 감각 신경을 자극하여 진전을 억제하는 방식을 사용하기에, 전극 인근의 피하 신경을 자극하여 지속적인 피부 자극을 유발하는 문제가 있다 [1-3].

이러한 TESS의 단점은 피부를 통과하는 자극 전류를 효율적으로 분산시킴으로써 해결할 수 있다. 동시 자극을 통한 공간적 분산 [2] 및 순차적 자극 통한 시간적 분산 [3] 모두 피부 자극을 감소시킬 수 있다고 알려져 있으나, 두 방법의 피부 자극 감소 효과를 서로 동일한 조건에서 비교하여 평가한 연구는 적다.

본 논문에서는 두 방법 중 심부 자극 강도 대비 피부 자극 강도가 낮은 자극 방법을 확인하기 위해 1, 3, 5, 7 개 채널 구성에서 동시 자극 방법과 순차적 자극 방법을 비교했다. 이를 위해 수치해석 시뮬레이션을 사용하여 상완 모델에서 자극 전략에 따른 신경 발화를 계산하고 각 전략에 따른 자극 강도를 계산하여 더욱 효과적인 TESS 자극 전략을 확인하였다.

II. 시뮬레이션 환경 구성

본 논문에서는 동시 자극 방법과 순차적 자극 방법의 피부 자극 감소 효과를 비교하기 위해, 총 자극 시간을 50 μ s 또는 300 μ s로 설정한 1, 3, 5, 7 개 채널 구성에서 상완 모델 자극 시의 신경 반응을 시뮬레이션 하여 비교하였다.

상완 모델은 피부, 피하지방, 근육, 뼈, 골수의 총 5 개 층으로 구성된 원기둥 모델로 기존 논문을 참고하여 구성되었다 [4]. 피부 자극 강도 및 심부 자극 강도를 확인하기 위해 피부 자극을 감지하는 피하 신경 모델과 심부 신경 자극을 감지하는 심부 신경이 상완 모델에 배치되었다. 상완 모델 및 신경 배치에 대한 자세한 정보는 그림 1a)에 묘사했다.

개별 채널은 상완 모델의 길이 방향으로 간격을 두고 모델 표면에 부착된 지름 15 mm 크기의 산화 전극과 환원 전극으로 구성되었다. 자극을 위해서는 상완 모델 표면에 20° 간격으로 배치된 20, 40, 60, 80 mm의 전극 간격을 가지는 채널 중 탐욕 알고리즘을 통해 선택된 채널만을 고려하였다. 단일 채널 구성의 경우 알고리즘에 따라 전체 채널 중 가장 높은 자극 효율을 가진 채널이 선택되었다. 이후 단일 채널을 기준으로 양방향으로 같은 각도만큼 떨어진 채널 쌍 중 전체 채널 구성의 자극 효율을 최대화하는 채널 쌍과 채널별 자극 비를 순차적으로 선택하여 3, 5, 7 개의 채널을 포함한 채널 구성을 얻었다. 이때 자극 효율은 주어진 채널 구성의 피하 신경 전기장 최댓값과 대비 심부 신경 전기장 최솟값으로 정의되었다. 구한 채널 구성에 대한 정보는 그림 1b)에 묘사했다.

모델 계산을 위한 시뮬레이터로는 Sim4Life(ZMT Zurich MedTech, Switzerland)와 NEURON(Yale university, USA)을 사용하였다.

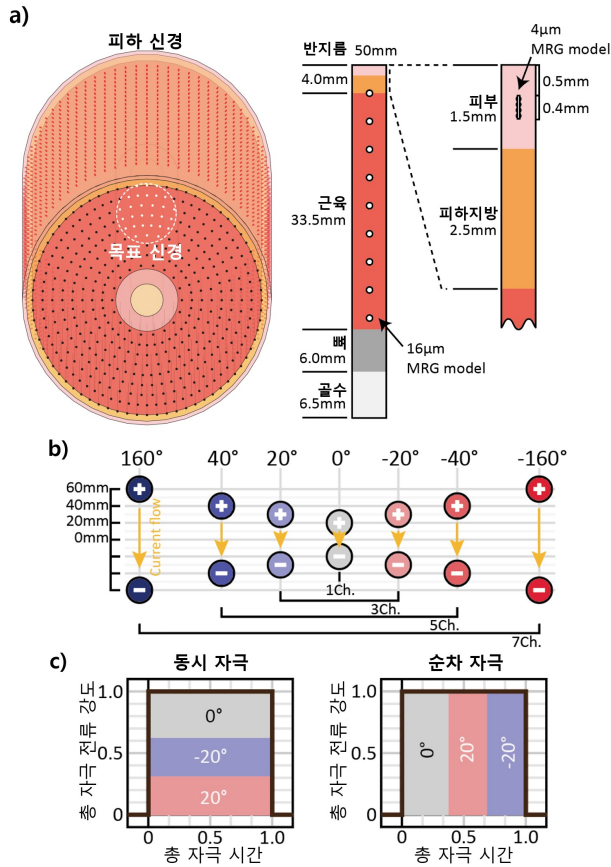


그림 1. 시뮬레이션 구성. a) 상완 모델의 구성 배치된 신경 모델의 위치 정보 b) 채널 구성 정보. +는 환원, -는 산화 전극을 의미함. c) 3 채널 기준 동시 자극 및 순차 자극 수행 예시

III. 자극 구성 및 평가 기준

본 연구에서는 평가를 위해 시간당 자극 전하량을 기준으로 사용했다. 자극 조건과 관계없이 시간당 자극 전하량을 동일하게 유지하기 위해, 동시 자극의 경우 자극 전류 강도를, 순차적 자극의 경우 채널의 자극 시간을 개별 채널별로 나누어 수행하였다. 자극 방법에 따른 자극 구성의 변화 예시를 그림 1c)에 묘사했다.

자극 전략에 따른 피부 자극 감소 효과를 평가하기 위해 동일한 심부 자극 상태를 기준으로 피부 자극 강도를 확인하고자 했다. 이를 위해 목표 신경을 모두 충분히 자극하기 위해 필요한 시간당 자극 전하량(목표 자극 전류)과 피부 자극을 유발하지 않는 시간당 자극 전하량 최대치(최대 자극 전류)를 구하고, 이를 비교하였다.

IV. 결론

그림 2 는 개별 자극 방법에 따른 목표 자극 전류와 최대 자극 전류를 나타낸 그래프이다. 우선 채널 수 증가 시 목표 자극 전류보다 최대 자극 전류의 증가 비율이 높았다. 이는 다채널 접근법이 피부 자극 감소에 효과적임을 보인 기존의 연구 결과와 일치한다 [2].

그림 2a)를 보았을 때, 총 자극 시간 변화 시 최대 자극 전류는 크게 변화하지 않았다. 또한 유사하게 자극 시간을 조절하는 순차적 방식에서 최대 자극 전류의 개선이 상대적으로 적었다. 이는 자극 전류 강도를 낮추는 것이 피부 자극 감소에 효과적임을 암시한다.

반면 그림 2b)의 목표 자극 전류의 경우 동시 자극 방식과 순차 자극 방식 간에 큰 차이를 보이지 않았다.

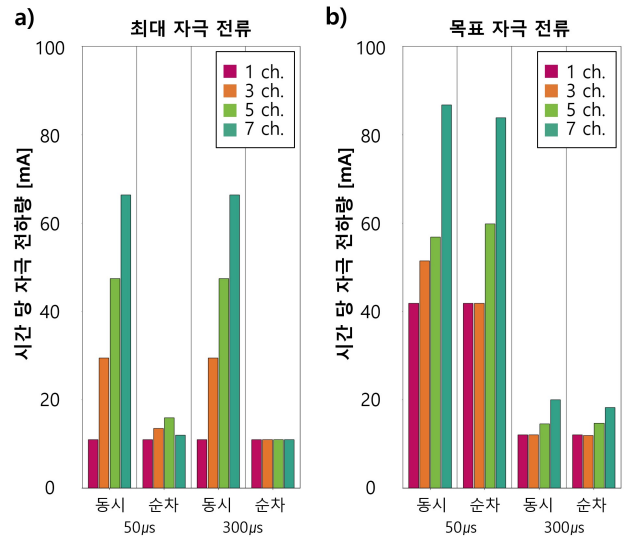


그림 2. 자극 방법에 따른 a) 최대 자극 전류 및 b) 목표 자극 전류.

이는 총 자극 전하량을 늘리는 것이 심부 신경 자극을 위해 효과적임을 보여준다.

이러한 연구 결과는 피부 자극이 적은 TES 기반의 진전 억제를 위해, 자극 시간이 긴 동시 자극 방식의 다채널 접근법을 사용하는 것이 유효함을 보여준다. 우리의 연구 결과를 통해 향후의 TES 를 사용하는 많은 분야에서 사용자의 편의성을 증진할 수 있을 것이라 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. RS-2023-00266171)과 과학기술정보통신부가 지원하는 한국뇌연구원(KBRI)을 통한 KBRI 기초연구 프로그램 (23-BR-04-04)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Pascual-Valdunciel A., Rajagopal A., Pons J. L., and Delp S. "Non-invasive electrical stimulation of peripheral nerves for the management of tremor," *Journal of the Neurological Sciences*, vol. 435, p. 120195, 2022.
- [2] Davids, M., Guérin, B., Klein, V., Schmelz, M., Schad, L. R., and Wald, L. L. "Optimizing selective stimulation of peripheral nerves with arrays of coils or surface electrodes using a linear peripheral nerve stimulation metric," *Journal of Neural Engineering*, vol. 17, no. 1, p. 016029, 2020.
- [3] Pena A.E., Abbas J.J., and Jung R. "Channel-hopping during surface electrical neurostimulation elicits selective, comfortable, distally referred sensations," *Journal of Neural Engineering*, vol. 18, no. 5, p. 055004, 2021.
- [4] Goffredo M., Schmid M., Conforto S., Bilotti F., Palma C., Vegni L., and D'Alessio T. "A two-step model to optimise transcutaneous electrical stimulation of the human upper arm," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 1329-1345, 2014.