

의용전자기기를 위한 무전원 인체 결합 전기 자극

송명환* · 이상민*[†]

Body-Coupled Electrical Stimulation for Battery-free and Wearable Bioelectronics

Myunghwan Song*, Sangmin Lee*[†]

ABSTRACT: We introduce a textile-based Body-coupled electrical stimulation (BES) system that utilizes energy loss from electronics and triboelectric energy generated during physical activity. We fabricated BES socks by weaving only conductive and polyester threads, providing both structural stability and wearing comfort. The BES socks generated electric fields ranging from tens to hundreds of mV/mm, which are sufficient to activate muscle cells. Both experimental and computational analyses verified the effective concentration of electric fields and validated the design parameters. Human trials showed significant enhancement in exercise performance, including a 21.5% increase in calf raise frequency and a 12.0% increase in repetition count, along with a 6.3% reduction in muscle fatigue.

초 록: 본 연구에서는 전자기기에서 발생하는 손실 에너지와 신체 활동에서의 마찰전기 에너지를 활용하는 직조형 인체 결합 전기 자극(Body-coupled Electrical Stimulation, BES) 시스템을 제안한다. BES 양말은 전도성 섬유와 폴리에스터 섬유만으로 직조하여 제작하였으며, 구조적 안정성과 착용 편의성을 동시에 확보하였다. 제작된 BES 양말은 수십에서 수백 mV/mm 범위의 전기장을 형성하였다. 인체 적용 실험에서는 비교군 대비 운동(카프 레이즈) 수행 빈도가 21.5% 증가하고 반복 횟수가 12.0% 증가하였으며, 근육 피로도는 6.3% 감소하는 등 유의한 운동 수행 능력 향상이 확인되었다.

Key Words: 전기자극(Electrical stimulation), 무전원(Battery-free), 인체결합(Body-coupled), 의용전자기기(Bioelectronics)

1. 서 론

전기 자극(Electrical Stimulation, ES)은 장기 치료 및 조직의 기능 회복을 위한 유망한 비약물적 치료 방법으로 전 세계적으로 활용되고 있다[1,2]. 파킨슨병, 뇌전증, 우울증과 같은 다양한 신경계 질환의 치료에 임상적으로 승인되어 적용되고 있으며, 골 재생 및 상처 치유 등 조직 재생 분야에서도 유의미한 효과를 보이고 있다. 또한 기능적 전기 자극(Functional Electrical Stimulation, FES)을 통해 근섬유 활

성화를 유도하는 등 근육 기능 회복에도 활용되고 있다. 최근에는 위장관 자극을 통한 체중 조절 보조 장치나 심박 조율 기능을 대체하는 이식형 장치 등, 전기 자극이 가능한 의용전자기기의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

그러나 이러한 기술은 대부분 배터리와 발전기에 의존하고 있으며, 최근 마이크로 배터리 기술이 발전하고 있음에도 불구하고 독성 문제와 교체의 불편함 등 해결해야 할 과제가 여전히 존재한다. 이에 따라 보다 편리하고 지속 가능한 전력 공급 방식의 필요성이 제기되고 있다. 인체에서

Received 27 February 2026, received in revised form 29 March 2026, accepted 5 May 2026

*School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea

[†]Corresponding author (E-mail: slee98@cau.ac.kr)

발생하는 전기적 에너지를 수확하여 전기 자극의 에너지 원으로 활용하는 에너지 하베스팅 기술이 제안되었으나, 발전기 설치를 위한 공간적 제약과 자극 부위와 전원 사이의 유선 연결 문제는 여전히 한계로 남아 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 인체를 매질로 활용하여 무선으로 에너지를 전달하는 새로운 접근법이 제안되고 있다. 예를 들어, 초음파를 이용하여 생체 조직 내에 이식된 발전기를 진동시켜 전기에너지를 생성하거나, 인체 결합 효과(body-coupling effect)를 이용해 전자기파를 인체를 통해 전달함으로써 소형 전자기기를 구동하는 방식이 보고되었다. 그러나 초음파는 기계적 진동을 유발하며, 고주파 전자기파는 생체 조직 내에서 유전 손실(dielectric loss)을 발생시켜 에너지를 열로 전환시키는 문제가 있다. 이로 인해 전달 거리에 따른 에너지 손실이 발생하고, 에너지원과 자극 부위의 위치가 제한되는 한계가 있다. 반면 1 kHz 이하의 극저주파(Extremely Low Frequency, ELF) 전자기파는 세포질, 세포외액, 이온 등으로 구성된 생체 조직에서 유전 손실을 유발하지 않으며, 인체 내 거리와 무관하게 전달될 수 있는 것으로 보고되었다. 그러나 이러한 방식 역시 전기 자극을 위해서는 여전히 발전기, 배터리, 추가 회로 및 기판이 필요하다는 제약이 존재한다.

최근 본 연구진은 에너지 하베스터나 배터리 없이도 인체 내 원하는 위치에 전기장을 집중시켜 무선 전기 자극을 유도할 수 있는 새로운 의용전자기기 개념을 보고하였다 [3-5]. 이는 인체 결합 효과를 통해 전달된 에너지가 전극의 공간적 구조에 의해 전위 왜곡(potential distortion)을 일으키는 원리에 기반한다. 이러한 전락을 인체 매개 전기 자극(Body-coupled Electrical Stimulation, BES)이라 명명하였으며, 이는 인체 결합을 통해 에너지를 전달함으로써 무선 전기 자극을 구현하는 기술이다. 사용되는 에너지는 전자기기에서 발생하는 전자기파의 손실 에너지 또는 신체 활동 중 발생하는 정전기(triboelectrification)이다. 전달된 에너지는 접지와 같이 서로 다른 전위를 갖는 물체와 접촉한 신체 부위로 확장되며, 인체 전반에 전위 분포를 형성한다. 이때 인체에 부착된 접촉 전극과 서로 다른 전위를 갖는 상대 전극을 연결하면, 전위 평형을 이루기 위해 전자가 이동하면서 전위가 왜곡되고, 그 결과 생체 조직 내에 국소적인 전기장이 형성된다.

본 연구에서는 추가적인 회로 및 전자장치를 최소화하고, 직조형 전기 자극 의류를 구현하는 것을 목표로 한다. 선행 연구에서는 BES의 개념을 제시하고 모사 구조를 통해 임상적 효과를 검증하였으나, 상용화를 위한 핵심 성능은 충분히 입증되지 않았다. 이에 본 연구에서는 전도성 섬유와 폴리에스터 섬유를 직조하여 양말 형태의 BES를 제작함으로써 직조형 전기자극 의용전자기기의 구조적 안정성을 확보하고, BES 양말의 설계 인자와 패턴 성능을 검증하였다. 마지막으로, 운동(카프 레이즈) 중 종아리 근육에

BES를 적용하여 운동 수행 능력 및 근피로도 변화를 평가하였다. 본 연구 결과는 직조형 BES 시스템이 인체 근육 조직의 활성화를 유도하고 운동 수행 능력을 조절할 수 있음을 실증적으로 제시한다.

2. 실험 방법

2.1 전기적 특성 및 성능 측정

전자기기 및 신체 활동에서 발생하는 손실 에너지는 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 측정 대상 전자기기를 한 손에 들고, 다른 손에는 오실로스코프 프로브를 접촉하여 전위를 측정하였다. 신체 활동에 의해 발생하는 전위는 한 손에 오실로스코프 프로브를 잡은 상태에서 다양한 동작을 수행하며 측정하였다.

전기장 및 유도 전압 측정은 온도 21.5°C, 상대습도 41%로 유지된 실내 환경에서 수행하였다. 측정에는 연구자 1인과 피험자 1인이 참여하였으며, 피험자의 좌측 종아리 비복근 부위에 접촉 전극과 측정 전극을 부착하였다. 피험자는 기립 자세를 유지하고 우측 손을 노트북에 접촉한 상태에서 실험을 진행하였다. 각 변수 조건에 대한 측정은 4회 반복하였으며 평균값과 표준편차를 산출하였다.

BES 양말의 전기장 측정을 위해 상대 전극 상부 1 mm 위치에 측정 전극을 부착하고, 멀티미터 프로브를 접촉 전극과 측정 전극에 각각 연결하였다. 보행과 같은 신체 활동 중 충격으로 인한 프로브 연결부 교란을 최소화하기 위해 측정 장치가 연결되지 않은 우측 발만을 제자리 보행 조건에서 측정하였다.

2.2 인체 적용 기능 평가

본 연구에는 총 15명(남성 11명, 여성 4명)의 참가자가 참여하였으며, 일반 양말과 BES 양말의 두 가지 조건에서 실험을 수행하였다. 모든 참가자에게 실험 내용에 대한 충분한 설명을 제공하였으며, 본 연구는 중앙대학교 기관생명윤리위원회(Institutional Review Board, IRB)의 승인을 받아 진행되었다.

실험 프로토콜은 2일에 걸쳐 수행되었으며, 착용 조건의 순서는 무작위로 배정하였다. 첫째 날에는 참가자별로 착용 조건을 무작위로 배정하였고, 둘째 날에는 첫째 날과 반대 조건으로 변경하여(일반 → BES 또는 BES → 일반) 실험을 진행하였다. 두 조건 사이에는 피로 누적 효과를 최소화하기 위해 2주의 회복 기간을 두었다.

본 연구에서는 BES 양말이 근피로를 감소시킬 수 있으며, 근피로가 감소할 경우 카프 레이즈의 반복 횟수 및 빈도가 증가할 것이라는 가설을 설정하였다. 이를 검증하기 위해 참가자는 선호하는 다리를 이용하여 한 발 카프 레이즈를 자신의 속도로 더 이상 수행할 수 없을 때까지 반복하였다.

근활성도는 표면 근전도 센서(surface electromyography,

sEMG)를 이용하여 2000 Hz의 샘플링 주파수로 측정하였다. sEMG 전극은 비복근 부위에 부착하였으며, 부착 위치는 SENIAM 가이드라인을 따랐다. 수집된 sEMG 신호는 60 Hz 배수의 노치 필터(notch filter)와 차단 주파수 10 Hz의 4차 Butterworth 저역 통과 필터(low-pass filter)를 적용하여 처리하였다.

참가자별 카프 레이즈 주기가 상이하었으므로, 각 참가자의 실패 시점부터 시작하여 전체 참가자 중 최소 반복수에 해당하는 22주기(cycle)에 대해 데이터를 분석하였다. 근피로 분석 지표로는 sEMG 신호의 중앙 주파수(median frequency, MF)를 사용하였다. 필터링된 sEMG 신호에 대해 1초 구간을 중첩(overlapping)하여 MF를 계산하였으며, 곡선 적합(curve fitting)을 통해 추세선을 도출하였다. 카프 레이즈 빈도는 전체 반복 횟수를 수행 시간으로 나누어 산출하였다.

MF 추세선 기울기의 부호를 데이터 제외 기준으로 설정하였다. 기울기가 양(+)의 값을 나타내는 경우 근피로가 회복되는 경향을 의미하므로, 본 연구의 가설 검증에 적합하지 않다고 판단하여 해당 참가자의 데이터는 최종 분석에서 제외하였다.

2.3 통계 분석

데이터 간 차이를 평가하기 위해 통계 분석을 수행하였다. 수집된 데이터의 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk 검정을 실시하였다. 정규성을 만족하는 경우 반복측정 분산분석(repeated-measures analysis of variance, RM-ANOVA)을 적용하였으며, 정규성을 만족하지 않는 경우에는 Friedman 검정을 사용하였다.

사후 분석(post-hoc analysis)의 경우, 반복측정 분산분석을 적용한 데이터에는 Sidak-Holm 보정을 적용한 대응표본 t-검정을 수행하였고, Friedman 검정을 적용한 데이터에는 Wilcoxon 부호순위 검정(Wilcoxon signed-rank test)을 실시하였다. 모든 결과는 평균 $\pm$ 표준편차(mean $\pm$ standard deviation) 형태로 제시하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 BES 메커니즘

BES 시스템은 주변 전자기기에서 발생하는 전자기장과 보행과 같은 신체 활동 중 생성되는 손실 에너지를 활용한다. 이러한 손실 에너지는 높은 상대 유전율(relative permittivity)을 갖는 인체를 매질로 하여 전달된다. 인체에 접촉 전극을 부착하고, 서로 다른 위치에 상대 전극을 배치하면 두 전극 사이에 전위차가 형성되어 에너지가 흐를 수 있는 조건이 마련된다.

인체를 통한 에너지 전달이 이루어지면 접촉 전극과 상대 전극 사이의 전기적 평형을 이루기 위해 전위가 재분포

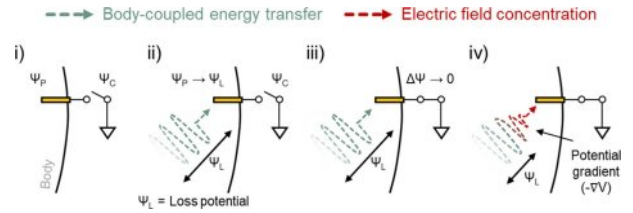


Fig. 1. Mechanism of body-coupled electrical stimulation (BES)

하게 된다. 이 과정에서 조직 내 전위 왜곡이 발생하며, 수동 전극 하부 영역에 전기장이 집중된다(Fig. 1). 형성된 국소 전기장은 특히 근육 세포와 같은 생체 조직을 자극하게 된다.

이 전기장은 세포막에 작용하여 전압 개폐성 이온 채널(voltage-gated ion channels)에 영향을 미치고, 그 결과 근육 활성화를 유도한다. 이온 채널의 활성화는 ATP 생성 증가에 기여하며, 이는 근섬유 활성화를 촉진하고 전반적인 근기능 향상으로 이어진다.

3.2 BES의 에너지원

BES는 전자기기에서 발생하는 에너지 손실과 신체 활동 중 생성되는 정전기(triboelectrification)를 전원으로 활용함으로써, 외부 전원 장치나 발전기를 필요로 하지 않는다. 이러한 손실 에너지는 극저주파(Extremely Low Frequency, ELF) 대역에 해당하며, 생체 조직에서의 유전 손실(dielectric loss)을 최소화하면서 인체 전반으로 전달될 수 있다.

전자기기에서는 주로 50~60 Hz의 주파수를 갖는 손실 전위(loss potential)가 발생하며, 이는 콘센트에 연결된 전자기기에서 주로 관찰된다(Fig. 2). 스마트폰 충전기, 노트북, 헤어드라이어 등 다양한 가전기기에 따라 약 10~200 V 범위의 에너지가 측정된다. 직류(DC)로 구동되는 기기에서도 교류(AC) 신호가 검출되는데, 이는 사용되지 않은 교류 에너지가 기기 외함 및 내부 배선을 통해 결합(coupling)되기 때문으로 해석된다. 선행 연구에서는 이러한 에너지가 주변 물질을 분극시키며 소산되지만, 전자기기의 소비 전력을 증가시키지 않으면서 유효한 전기에너지로 전환될 수

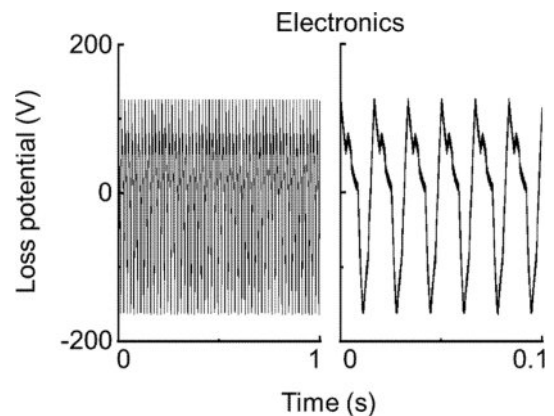


Fig. 2. Energy losses from electronics (laptop)

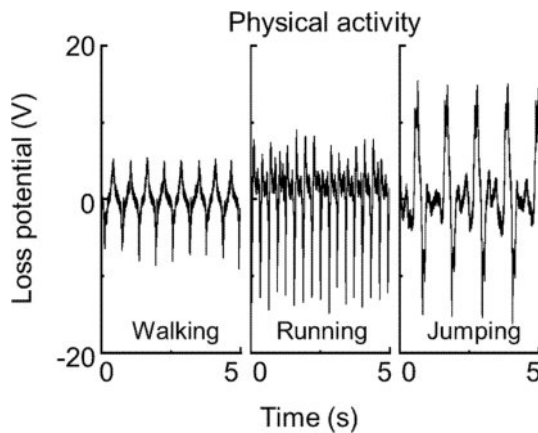


Fig. 3. Energy losses from physical activity

있음을 보고하였다. 이러한 에너지 손실에 대한 추가적인 논의가 필요하나, 이는 현재 활용되지 않고 소모되는 에너지원으로서 안정적이고 유의미한 전력원으로 활용될 가능성을 지닌다.

한편, 보행이나 의복 마찰과 같은 반복적인 신체 활동으로부터 발생하는 정전기 역시 비정현파(non-sinusoidal) 형태의 ELF 전기 에너지 손실을 유도한다(Fig. 3). 신체 움직임과 직접적으로 연관된 특성상, 이러한 에너지의 주파수는 일반적으로 6 Hz를 초과하지 않는다. 이와 같은 저주파 에너지는 인체를 통해 비교적 용이하게 전달될 수 있으며, 여러 연구에서 보고된 바와 같이 유효한 전기에너지로 전환이 가능하다.

3.3 BES 성능 검증

최적화된 BES 설계를 적용한 양말을 활용하여 일상생활 환경에서의 전기장 집중 효과를 검증하였다. 입력원은 전자기기에서 손실되는 에너지(Input 1)와 신체 활동을 통해 발생하는 마찰전기 에너지(Input 2)로 구성된다. 전기장은 각 입력 조건을 독립적으로, 그리고 동시에 인가하여 측정하였다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이, 정지 상태에서 별도의 입력이 없더라도 일상생활에서 발생하는 전기적 노이즈에 의해 약한 전기장이 형성된다. 신체 활동(보행) 시에는 Input 2에 의해 비정현파 형태의 손실 전위가 생성되며, 이로 인해 BES 구조 주변에는 불규칙한 전기장이 형성된다. 한편, 충전 중인 휴대전화를 Input 1로 사용한 경우에는 휴대전화에서 방출되는 150 V(60 Hz)의 정현파 손실 전위에 의해 100 mV/mm를 초과하는 안정적이고 강한 전기장이 형성되었다.

3.4 BES의 생리학적 효과 검증

카프 레이즈 동작 중 운동 수행 능력과 근피로에 대한 BCES의 효과를 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 다음 두 가지 가설을 설정하였다. 첫째, BCES는 근피로

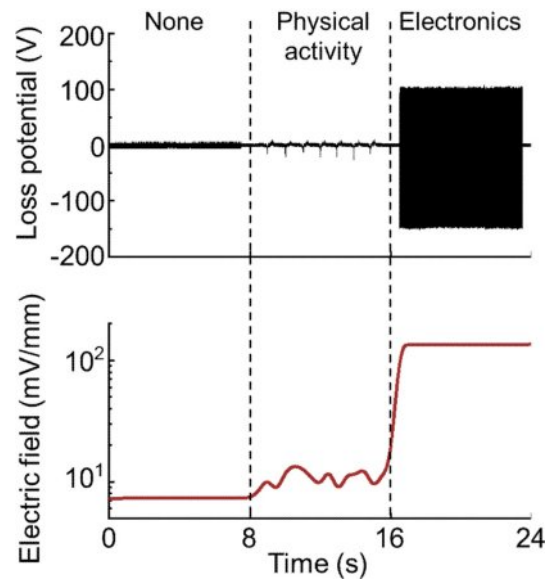


Fig. 4. Loss potential with respect to input conditions and electric field of BES socks

를 감소시킬 수 있다. 둘째, BCES 양말이 근피로를 감소시킨다면, 카프 레이즈 반복 횟수와 동작 빈도가 증가할 수 있다. 이 두 가설을 검증하기 위해 각 참가자는 선호하는 다리를 사용하여 한쪽 다리 카프 레이즈 동작을 자율 속도로 수행하였으며, 더 이상 수행할 수 없을 때까지 반복하였다.

근피로가 누적될수록 근전도(EMG) 신호의 중앙 주파수(median frequency)는 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 표면 근전도 센서(sEMG)를 사용하여 중앙 주파수 변화 추세선의 기울기를 분석함으로써 근피로를 정량화하였다.

첫 번째 가설과 관련하여, 다섯 명의 참가자에서 중앙 주파수 추세선 기울기의 감소가 관찰되었다. 비자극(CTRL) 양말 조건과 비교했을 때, BES 양말 조건에서 평균 기울기 값은 -0.256 ± 0.191 에서 -0.240 ± 0.123 으로 6.3% 감소하였다(p-value = 0.878) (Fig. 5). 그러나 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다.

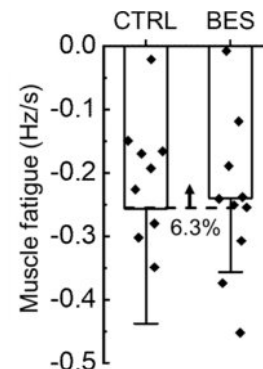


Fig. 5. Reduction rate of the average slope of median frequency

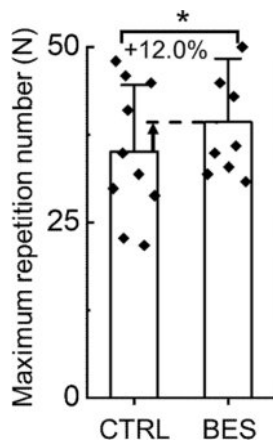


Fig. 6. Increasing rate of the maximum repetition number of calf raise

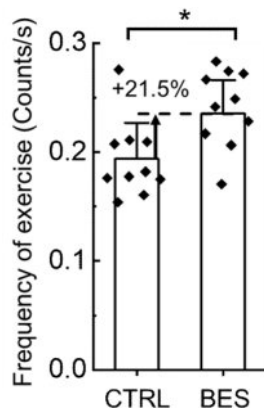


Fig. 7. Increasing rate of the average frequency of calf raise

두 번째 가설과 관련하여, BES 양말 착용 시 카프 레이즈 평균 반복 횟수는 35.10 ± 9.48 에서 39.30 ± 9.03 으로 12.0% 유의하게 증가하였다(p -value = 0.045) (Fig. 6). 동작 수행 시간은 180.00 ± 48.77 에서 170.30 ± 39.26 으로 5.39% 감소하였으나(p -value = 0.437), 통계적으로 유의하지는 않았다. 반면, 카프 레이즈 빈도는 0.194 ± 0.035 에서 0.235 ± 0.033 으로 21.5% 유의하게 증가하였다(p -value = 0.019) (Fig. 7). 또한 두 번째 가설과 관련하여, 다섯 명의 참가자에서 추세선 기울기 감소가 관찰되었다.

임상시험 결과는 BES 양말이 운동 수행 능력을 향상시키고 근피로를 완화하는 데 기여할 수 있음을 보여주었다. 실험 결과는 카프 레이즈 동작 중 비복근의 피로를 감소시킬 가능성을 시사한다. 첫 번째 가설의 관점에서 보면, BES 양말 조건에서 평균 기울기가 CTRL 양말 조건 대비 6.3% 감소하였다. 다만, 중앙 주파수 기울기 감소는 다섯 명의 참가자에게서만 관찰되었으며, 두 조건 간 통계적 유의성은 확인되지 않았다. 반면 두 번째 가설의 관점에서는, BES 양말 착용 시 반복 횟수와 동작 빈도가 각각 12.0%(p = 0.045)와 21.5%(p = 0.019) 유의하게 증가하였다. 이러한 결과를

바탕으로, BES 양말은 카프 레이즈 동작 중 비복근의 피로를 완화할 가능성이 있으며, 그 효과는 준정적(quasi-static) 동작뿐 아니라 보다 동적인 보행 운동에도 확장될 수 있을 것으로 판단된다.

한편, BES 양말 조건과 CTRL 양말 조건 간 평균 기울기에서 유의한 차이가 나타나지 않은 이유는 인간 대상 실험 프로토콜의 설계 특성에 기인한 것으로 해석된다. 기존의 웨어러블 시스템이 근피로에 미치는 영향을 분석한 일반적인 실험 프로토콜에서는 메트로놈을 활용한 동작 빈도 제어, 실험 시간 제한, 반복 횟수 고정 등의 제약 조건을 부여하였다. 그러나 본 연구에서는 참가자에게 동작 빈도, 실험 시간, 반복 횟수에 대한 별도의 제약을 두지 않았다. 이러한 비제한적 설계로 인해, 각 참가자의 실패 지점을 기준으로 역방향으로 특정 반복 구간의 데이터를 분석하였다. 하지만 두 조건 간 카프 레이즈 반복 횟수 차이로 인해 중앙 주파수 분석에 사용된 데이터의 시작 지점을 동일하게 설정할 수 없었다. 향후 연구에서는 동작 빈도, 반복 횟수, 실험 시간 등의 구체적인 제약 조건을 포함한 추가 실험 프로토콜을 설계하여 보다 정밀한 검증을 수행할 계획이다.

4. 결 론

본 연구에서는 전자기기에서 발생하는 손실 에너지와 신체 활동 중 생성되는 마찰대전 에너지를 활용하는 직조형 BES 양말을 제안하였다. BES 양말은 상용 전도성 섬유와 폴리에스터 섬유를 직조하여 제작되었으며, 이를 통해 웨어러블 의용전자기기의 안정성과 착용 편의성을 동시에 확보하였다. 향후 연구에서는 보행이나 달리기와 같은 보다 동적인 이동 동작을 포함하도록 실험 프로토콜을 확장할 계획이다.

직조형 BES 시스템은 무선 전기 자극을 대체할 수 있는 무원전 기술로 평가된다. 또한 최근 개발된 스마트 섬유 기술과 BES를 통합할 경우, 사용자가 보다 정밀하게 자극을 제어하고 상호 상승 효과를 극대화할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 기술의 웨어러블 의용전자기기 분야 적용은 생체 조직 활성화 및 다양한 질환 치료를 목표로 한 상용화 측면에서도 높은 잠재력을 보여준다.

후 기

본 연구는 2025년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-02214162).

REFERENCES

1. Ferrigno, B., Bordett, R., Duraisamy, N., Moskow, J., Arul, M.

- R., Rudraiah, S., Nukavarapu, S.P., Vella, A.T., and Kumbar, S. G., "Bioactive Polymeric Materials and Electrical Stimulation Strategies for Musculoskeletal Tissue Repair and Regeneration", *Bioactive Materials*, Vol. 5, 2020, pp. 468-485.
2. Thirivikraman, G., Boda, S.K., and Basu, B., "Unraveling the Mechanistic Effects of Electric Field Stimulation Towards Directing Stem Cell Fate and Function: A Tissue Engineering Perspective", *Biomaterials*, Vol. 150, 2018, pp. 60-86.
3. Yong, H., Song, H., Kim, D., Park, J., Heo, D., Cha, K., Song, M., Jung, S., Choi, W.J., Hwang, P.T.J., Kim, S., Nam, W., Lee, G., Hong, J., and Lee, S., "Synchronous Generation of Electrical and Cellular Energies via Body-Mediated Energy Transfer: Inevitable Electric Field Concentration", *ACS Energy Letters*, Vol. 8, 2023, pp. 2954-2961.
4. Jung, S., Yong, H., Lee, M., Kim, B., Kang, T. Y., Jang, H. S., Choi, W.J., Kim, D.C., Choi, M.H., Bang, G.U., Hwang, H.Y., Choi, S.H., and Lee, S., "Unraveling the Missing Link of Bio-Electrical Stimulation from Body-Mediated Energy Transfer", *Advanced Functional Materials*, Vol. 33, 2023, 2302465.
5. Yong, H., Jung, S., Heo, D., Choi, W., Chung, J., Cho, S., Hwang, P., Song, H., Koh, W.G., Lee, W., Lee, S., and Hong, J., "Body-mediated Energy Loss Conversion for Personalized Cell Vitalization", *Nano Energy*, Vol. 87, 2021, 106209.