

Development of EMG-Triggered Functional Electrical Stimulation Device for Upper Extremity Bilateral Movement Training in Stroke Patients: Feasibility and Pilot study

Changho Song^a, Dong-kwon Seo^{b*}

^aDepartment of Physical Therapy, College of Health and Welfare, Sahmyook University, Seoul, Republic of Korea

^bDepartment of Physical Therapy, College of Medical Science, Konyang University, Daejeon, Republic of Korea

Objective: Bilateral movement training is an effective method for upper extremity rehabilitation of stroke. An approach to induce bilateral movement through functional electrical stimulation is attempted. The purpose of this study is to develop an EMG-triggered functional electrical stimulation device for upper extremity bilateral movement training in stroke patients and test its feasibility.

Design: Feasibility and Pilot study design.

Methods: We assessed muscle activation and kinematic data of the affected and unaffected upper extremities of a stroke patient during wrist flexion and extension with and without the device. Wireless EMG was used to evaluate muscle activity, and 12 3D infrared cameras were used to evaluate kinematic data.

Results: We developed an EMG-triggered functional electrical stimulation device to enable bilateral arm training in stroke patients. A system for controlling functional electrical stimulation with signals received through a 2-channel EMG sensor was developed. The device consists of an EMG sensing unit, a functional electrical stimulation unit, and a control unit. There was asymmetry of movement between the two sides during wrist flexion and extension. With the device, the asymmetry was lowest at 60% of the threshold of the unaffected side.

Conclusions: In this study, we developed an EMG-triggered FES device, and the pilot study result showed that the device reduces asymmetry.

Key Words: Stroke, Rehabilitation, Electromyography, Electrical stimulation

서론

뇌졸중은 여러 국가에서 사망 및 장애의 주요 원인이며 [1], 미국에서는 해마다 약 795,000건의 뇌졸중이 발생한다[2]. 최근 급성 및 급성 이후 단계 치료법의 개선에도 불구하고 여전히 2030년까지 세계 주요 장애의 원인이 될 것으로 예상된다[3]. 뇌졸중은 장애를 남기는데 뇌졸중 환자의 55%는 상지마비를 가지며[4], 85% 이상이 상지의 불완전한 운동 회복을 경험한다[5]. 상지마비는 일상생활의 여러 가지 활동을 방해하여, 기능적 독립성을 감소시키므로, 뇌졸중 환자의 재활에서 가장 중요한 목표는 상

지의 기능 회복이다[6]. 뇌졸중 환자를 위한 상지의 기능적 훈련은 주로 손상측 상지의 근력 강화 혹은 기능 향상에 초점을 맞춘다. 그러나 상지의 기능적 활동은 대부분 양측성이며, 많은 일상생활에서 양손의 조화된 참여가 필요하다[7, 8].

최근 연구에 따르면, 과제 지향적인 양측 상지 훈련이 뇌졸중 환자의 상지 기능회복에 효과적이라고 보고하였다 [9]. 과제 지향적인 양측 상지 훈련은 환자가 동시에 양측 팔을 사용하여 과제를 수행하도록 하는 것이다[10]. 또한 양측 상지 훈련의 기본 전제는 상지 근육이 동시에 활성화되어 대칭적 양측 운동이 양쪽 대뇌 반구에서 유사한

Received: Sep 21, 2021 Revised: Sep 28, 2021 Accepted: Sep 28, 2021

Corresponding author: Dongkwon Seo (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3328-4922>)

Department of Physical Therapy College of Medical Science, Konyang University.

35365 158, Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon, Republic of Korea

Tel: E-mail: dkseo77@konyang.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © 2021 Korean Academy of Physical Therapy Rehabilitation Science

신경망을 활성화한다는 것이다[11]. 이러한 결과를 바탕으로 양측 상지 훈련은 뇌졸중 이후운동을 계획하고 실행하는 대뇌 피질의 신경 가소성을 촉진할 수 있다[12]. 그러나 뇌졸중 이후 마비된 상지의 운동 과정은 뇌손상 이후 적절한 힘의 생성과 조절이 이루어지지 않아 [13], 적절히 과정을 수행할 수 없으므로 [14], 운동으로 인한 손상 측에 고유성 경험을 제공하지 않는다[15].

이러한 문제점을 보완하고 양측 상지 훈련의 효과를 높이기 위해 근전도 유발 전기자극(EMG-triggered neuromuscular stimulation)이 사용되었다. 근전도 유발 전기자극은 환자가 손상측 상지의 자발적인 수축을 요구하며[16], 환자가 스스로 생성한 근전도 활동이 피부의 전기 자극으로 보충되어, 상지의 특정 동작을 가능하게 한다[17]. 따라서 환자에 의해 제어되기 때문에 스스로 운동명령에 따라 적절한 고유감각 피드백을 경험하며, 상지 기능을 향상시킬 수 있다[18].

일반적인 근전도 유발 전기자극을 이용시 환자는 적절한 근육에서 자발적인 근수축을 요구받고, 목표 임계값까지 충분한 근수축이 요구된다. 그러나 일반적인 근전도 유발 전기자극시 뇌졸중 환자들의 경우 마비로 인해서 환측에서는 충분한 EMG 신호가 발생하지 않아 다양한 동작을 만들 수 없다[12]. 따라서 본 연구에서는 선행연구들의 장점인 근전도 유발 전기자극을 건축에 적용하여 양측 상지훈련의 효과를 극대화하고 모든 환자들이 사용이 가능한 EMG-trigger 기능적 전기자극 장치를 개발하며 그 타당성을 확인하고자 한다.

연구 방법

EMG-triggered 기능적 전기자극 장치의 개발

뇌졸중 환자의 양손 훈련이 가능하도록 EMG-triggered 기능적 전기자극 장치를 개발하였다. 2채널의 EMG센서를 통해 들어온 신호로 기능적 전기자극치료를 제어하는 시스템을 개발하였다. 장치의 구성은 근전도 센싱부와 기능적 전기자극부, 제어부로 구성된다. 근전도 센싱부는 2개의 전완근육의 전기적 신호를 수집하는 역할을 하며 2개의 근전도 센서(MyoWare Muscle Sensor, SparkFun Electronics, USA)는 훈련 목적에 따라 건축의 수근신전근, 수근굴곡근의 전기신호를 수집하여 아두이노미니(Arduino Pro Mini 328, SparkFun Electronics, USA)를 통해 패킷화하고 패킷한 신호는 무선통신 프로토콜(Bluetooth)를 통해 모바일기기의 제어부로 전송된다.

제어부는 안드로이드 패드내 앱으로 개발하였고 센싱부에서 전달된 신호를 시각화하여 제어할 수 있도록 하였다. 환자의 건축 전완 근육에 근전도 전극(Ag/AgCl

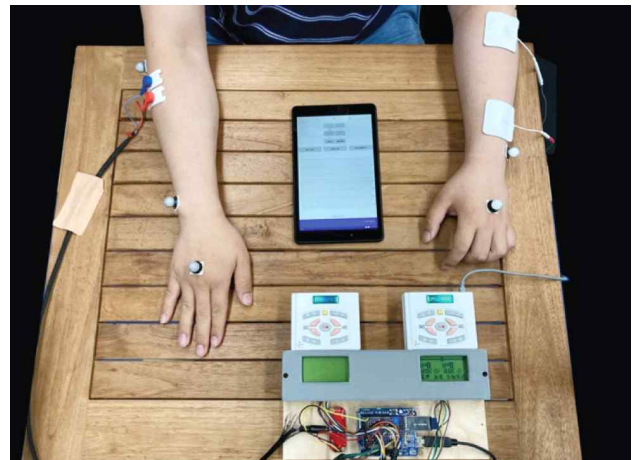


Figure 1. EMG-triggered functional electrical stimulation device

표면 전극 H2223H, 3M, USA)을 부착하고 환자는 제어부의 지시에 따라 3회 동작을 수행한다. 근전도 센서를 통해 수집된 근육활성신호를 제어부에서 분석하여 기능적 전기자극부의 역치값의 기준을 삼으며 기준값은 최대값의 백분위로 정한다. 치료사는 환자의 상태에 따라 목표 역치값을 가감할 수 있다. 기능적 전기자극 후 환측의 근육이 수축을 시작하는 시간까지의 지연시간을 감안하여 역치값은 최대값에 50~70%에서 결정한다. 기준값 설정이 끝난 후 대상자가 훈련동작을 수행하여 목표 역치값에 도달하면 기능적 전기자극부에서는 환측의 목표 근육을 자극하여 동작을 수행하도록 한다. 기능적 전기자극부의 강도는 환자의 근육과 운동단위의 상태에 따라 미리 설정한다. 건축에서 수집된 활성신호가 역치값 이하로 내려가면 기능적 전기자극부는 자극을 멈춘다. 제어부의 모바일 장치에서는 상태를 꺾은선형 그래프로 디스플레이하며 치료사는 디스플레이되는 화면을 보면서 환자를 지도한다.

파일럿 연구의 대상

본 연구는 뇌졸중 환자 1인을 대상으로 하였으며, 대상자의 구체적 선정 기준은 뇌졸중 진단을 받고 6개월 이상 지난 만성 뇌졸중 편마비 환자, 인지능력이 간이정신상태 검사에서 24점 이상으로 운동수행에 문제가 없는 자, 브룸스트롬의 운동 회복 단계가 3단계 이상인 자로 하였다. 본 연구에 들어가기에 앞서 대상자에게 연구의 목적과 절차에 대하여 설명을 하고 자발적으로 연구 참여 동의서에 서명한 뒤에 연구에 참여하도록 하였다. 본 연구는 건양대학교 연구윤리위원회의 심의를 거쳐 승인 후 진행하였다.

실험 절차

대상자의 상지 움직임의 비대칭을 확인하기 위해 수근관절의 굴곡과 신전을 수행하도록 하였고 건측과 환측의 근활성도와 운동형상학적 데이터의 비대칭성을 확인하였다. 이어 개발된 장치를 착용하고 건측의 역치값을 확인하였고, 기능적 전기자극장치의 작동을 위한 trigger 값을 건측의 역치값의 50%부터 시작하여 10%씩 늘려나가면서 건측과 환측의 운동형상학적 대칭성을 확인하였다.

측정 도구와 자료 수집 과정

근활성도

대상자의 주요요추수근신근, 요추수근굴근 근활성도를 보기 위해 표면 근전도(Ultium, Noraxon Inc., USA)를 사용하였다. 전완 굴근, 신근 부위에 피부를 사포로 문질러 피부 저항을 최소화하고 소독을 하여, 측정 오류 방지를 하였으며, 근육의 임피던스는 70K ohm 미만이 되도록 하였다. 근육 활성화를 측정하기 위해 이중 EMG 습식 젤 전극(Single electrode T246H, SEED TECH, 한국) 전극과 함께 표면 근전도 검사를 사용하였다.

주요요추수근신근의 표면근전도 부착부위는 외측상과와 요골의 경상돌기의 길이에서 몸쪽 17% 부위의 근복부위로 하였고 요추수근굴근의 표면근전도 부착부위는 내측상과와 요골의 경상돌기의 길이에서 요추수근굴근의 근복부위로 하였다. 전극각 간격은 2 cm 간격으로 부착하였다.

수집된 자료는 근전도 소프트웨어(MyoResearch Master 1.08 XP, Noraxon Inc., USA)를 사용하여 저장되고 분석되었다. 표본 추출률은 2,000 Hz로 설정하였고, 주파수 대역폭은 80~250 Hz로 하였고, 대역차단 필터는 60 Hz로 하였다. 측정된 근육의 근전도 신호는 정류 후, 근전도 신호의 실질적으로 출력 값에 가까운 값을 제공하는 평균 제곱근 법으로 처리하였다.

운동형상학적 데이터

운동학적 데이터를 얻기 위해 3D 모션 분석을 사용하였다. 300Hz의 적외선 카메라(miquis 300, Qualisys, Sweden) 12대를 사용하여 피사체의 움직임을 포착하였으며, 데이터는 Qualisys 모션 캡처 시스템(Qualisys Track Manager, Qualisys, Sweden)을 통해 획득 및 분석하였다. 흉골 중앙, 양측 견봉, 주관절 외측 상과, 척골 경상돌기, 제3중수지절관절에 마커를 부착하였다. 카메라에 저장된 운동학적 파라미터를 분석하였다. 여기에서 분석된 운동학적 매개변수는 굴곡 신전 각도, 움직임 시작점, 움직임 종료 시점, 움직임 속도를 분석하였다.

연구 결과

연구 대상자의 일반적 특성

정상 성인의 연령은 32세로 신장은 182 cm이었다. 체중은 82 kg이었다. 유병기간은 6년 3개월이었고 병인은 뇌경색이었다. 브룸스트롬 3단계이다.

비자극시 양쪽 팔의 근활성도 및 운동형상학 비교

마비측 수근관절의 평균 신전 각도는 1.50 ± 1.21 이며 비마비측 평균 신전 각도는 27.23 ± 3.17 이었다. 마비측 수근관절의 평균 굴곡 각도는 4.01 ± 2.11 이며 비마비측 평균 굴곡 각도는 19.40 ± 0.89 이었다. 수근관절의 굴곡과 신전시 근활성도는 그림 2와 같다. 수근관절의 신전시 마비측 주요요추수근신근의 평균 활성도는 6.29 ± 1.41 이며 비마비측은 22.18 ± 9.53 이었다. 수근관절의 굴곡시 마비측 주요요추수근굴근의 평균 활성도는 5.05 ± 2.03 이며 비마비측은 18.20 ± 0.65 이었다.

자극시 양쪽 팔의 운동형상학 비교

EMG-triggered 기능적 전기자극 장치를 사용한 상태에서 마비측의 움직임과 비마비측의 움직임을 비교하여 움직임의 대칭성을 확인한 결과 역치값의 50%에서는 평균 1.21로 마비측이 먼저 최고점에 도달하였고, 60%에서는 0.97로 가장 비슷한 수준으로 움직임이 나타났고, 70%에서는 0.86, 80%는 0.71, 90%이상에는 마비측의 동작이 수행되지 않았다.

고찰

지난 10년간 뇌졸중 환자의 상지재활에 주목을 받는 치료방법은 환시를 이용한 거울치료와 건측사지의 움직임을 제한하여 환측의 움직임을 강제로 유도하는 강제유도 치료, 양쪽의 팔을 동시에 활성화시키는 양측 상지 훈련 등이다. 강제유도치료는 건측의 사용을 제한하고 양측 상지 훈련은 건측의 사용을 활성화시키는 부분에서는 상반된 방법으로 보여지지만 두 접근법 모두 환측의 활성화를 유도한다는 점에서는 공통적인 치료목표를 갖는다. 양측 상지 훈련은 뇌졸중 후 중단된 대뇌반구간의 역제의 균형을 재조정하여 두 반구의 동시 활성화를 유도하며 이를 통해 마비된 팔의 움직임을 촉진하는 것으로 가정한다. 반구간 경쟁모델에서는 뇌졸중 후 건측에서의 역제가 환측의 회복을 방해한다고 제안한다[19]. 이러한 방해는 움직임을 저하시키거나 약화시키는 것과 관련이 있는 것으로 보고되었다. 양측 상지 훈련은 이러한 대뇌 반구간의 균형을 재조정하여 기능을 향상시키는 것으로 생각한다[20].

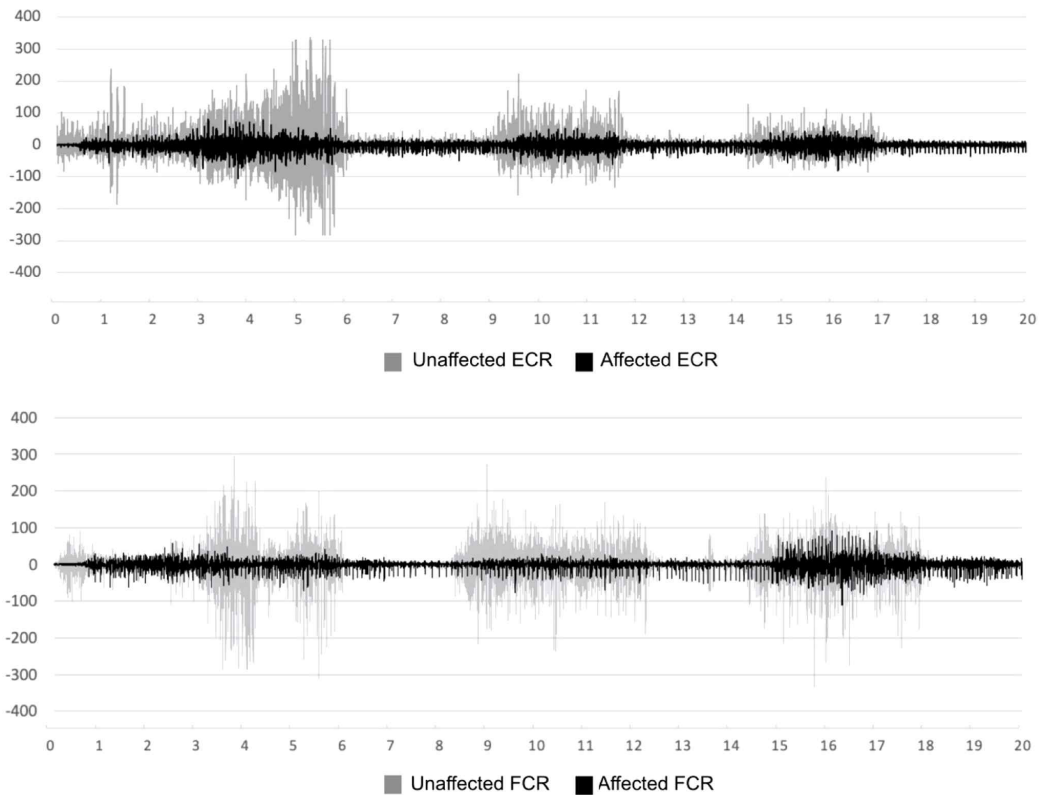


Figure 2. Muscle activation of unaffected and affected forearm muscle

Renner와 Brendel [21]의 연구에서는 양측 상지 훈련과 단측 상지 훈련을 비교하여 양측상지 훈련이 기능 회복에 더 효과적임을 보고 하였다. 양측 상지 훈련은 양측 뇌를 활성화시키고 대뇌의 동측 일차 운동 영역과 전운동 영역의 활성을 증가시키지만 단일 상지 훈련을 피질 및 전운동 피질 내 활성 증가를 유발하는 것으로 관찰되는 반면, UT는 후대상피질, 하측두회, 하전두회를 활성화시키는 것으로 관찰되어 서로 다른 신경 기전을 통해 작동한다고 보고되었다[22]. 본 연구에서는 선행연구에서 보고된 양측 상지 훈련의 효과를 활용하기 위해 EMG-triggered 기능적 전기자극 장치를 개발하였고 그 타당성을 확인하기 위해 파일럿 연구를 시행하였다. 장치를 사용하지 않은 상황에서 대상자의 상지 움직임은 환측과 건측의 차이를 보여 근육활성화와 운동형상학적인 데이터의 비대칭을 나타내었다. 개발된 장치를 사용한 상태에서 과제를 수행할 때는 사용하지 않았을 때의 비대칭적 움직임은 감소하였고 건측 활성화의 역치값의 60%에서 가장 대칭적인 것으로 나타났다. 이 결과를 통해 이 장치를 활용한 양측 상지 훈련의 가능성을 확인하였다. 본 연구는 개발된 장치의 타당성을 확인하고자 한 것으로 이 장치가 상지 기능 회복에 미치는 효과를 규명하지는 못했다. 향후 이 연구의 결과를 토대로 뇌졸중환자의 상지 재

활을 위한 단기적 혹은 장기적 효과를 증명하는 연구가 필요하다고 생각한다.

결론

본 연구에서는 양측 상지 훈련의 효과를 활용하기 위해 EMG-triggered 기능적 전기자극 장치를 개발하였고, 장치를 활용할 때 움직임의 비대칭성이 감소하는 것으로 나타났다. 향후 효과에 대한 검증연구가 필요하다.

이해 충돌

본 연구의 저자들은 연구, 저자권, 및 출판과 관련하여 잠재적인 이해충돌이 없음을 선언합니다.

감사의 글

이 성과는 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018R1C1B5086043).

참고문헌

- Broeks JG, Lankhorst GJ, Rumping K, Prevo AJ. The long-term outcome of arm function after stroke: results of a follow-up study. *Disabil Rehabil.* 1999; 21:357-64.
- Virani SS, Alonso A, Aparicio HJ, Benjamin EJ, Bittencourt MS, Callaway CW, et al. Heart Disease and Stroke Statistics-2021 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation.* 2021; 143:e254-e743.
- Mukherjee D, Cg P. Epidemiology and the global burden of stroke. *World neurosurgery.* 2011;76: S85-90.
- Jorgensen HS, Nakayama H, Raaschou Ho V-LJ, Stoier M, Ts O. Outcome and time course of recovery in stroke. Part I: Outcome. 1995;76:399-405.
- Kwakkel G, Kollen BJ, Hi K. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review. *Neurorehabilitation and neural repair.* 2008;22:111-21.
- Whitall J, McCombe Waller S, Silver Kh MRF. Repetitive bilateral arm training with rhythmic auditory cueing improves motor function in chronic hemiparetic stroke. *Stroke.* 2000;31:2390-5.
- Chan MK, Tong RK, Ky C. Bilateral upper limb training with functional electric stimulation in patients with chronic stroke. *Neurorehabilitation and neural repair.* 2009;23:357-65.
- Knutson JS, Harley MY, Hisel TZ, Hogan Sd MMM, Chae J. Contralaterally controlled functional electrical stimulation for upper extremity hemiplegia: an early-phase randomized clinical trial in subacute stroke patients. *Neurorehabilitation and neural repair.* 2012;3:239-46.
- Oujamaa L, Relave I, Froger J, Mottet D PJY. Rehabilitation of arm function after stroke. Literature review. *Annals of physical and rehabilitation medicine.* 2009;52:269-93.
- Mays R, McIntyre A, Kwok CTR. Bilateral arm training in the chronic phase of stroke rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Dalhousie Medical Journal.* 2014;41:1-.
- Stewart KC, Cauraugh JH, Jj S. Bilateral movement training and stroke rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the neurological sciences.* 2006;244:89-95.
- Cauraugh JH, Jj S. Neural plasticity and bilateral movements: A rehabilitation approach for chronic stroke. *Progress in neurobiology.* 2005;75:309-20.
- Trombly CA. Deficits of reaching in subjects with left hemiparesis: a pilot study. *American Journal of Occupational Therapy.* 1992;46:887-97.
- Popović MD, Kostić MD, Rodić SZ, Konstantinović LM. Feedback-mediated upper extremities exercise: increasing patient motivation in poststroke rehabilitation. *BioMed research international.* 2014;2014.
- Arya KN, Pandian S, Kumar D, Puri V. Task-Based Mirror Therapy Augmenting Motor Recovery in Poststroke Hemiparesis: A Randomized Controlled Trial. *Journal of stroke and cerebrovascular diseases : the official journal of National Stroke Association.* 2015;24:1738-48.
- Cauraugh JH, Kim S. Two coupled motor recovery protocols are better than one: electromyogram-triggered neuromuscular stimulation and bilateral movements. *Stroke.* 2002;33:1589-94.
- Cauraugh J, Light K, Kim S, Thigpen M BA. Chronic motor dysfunction after stroke: recovering wrist and finger extension by electromyography-triggered neuromuscular stimulation. *Stroke.* 2000;6:1360-4.
- Kojima K, Ikuno K, Morii Y, Tokuhisa K, Morimoto S, Shomoto K. Feasibility study of a combined treatment of electromyography-triggered neuromuscular stimulation and mirror therapy in stroke patients: a randomized crossover trial. *NeuroRehabilitation.* 2014;34:235-44.
- Ward NS, Cohen LG. Mechanisms underlying recovery of motor function after stroke. *Archives of neurology.* 2004;61:1844-8.
- Murase N, Duque J, Mazzocchio R, Cohen LG. Influence of interhemispheric interactions on motor function in chronic stroke. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society.* 2004;55:400-9.
- Renner CI, Brendel C, Hummelsheim H. Bilateral Arm Training vs Unilateral Arm Training for severely affected patients with stroke: exploratory single-blinded randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation.* 2020;101:1120-30.
- G. BROEKS J, Lankhorst G, Rumping K, Prevo A. The long-term outcome of arm function after stroke: results of a follow-up study. *Disability and rehabilitation.* 1999;21:357-64.