

하지 근육 시너지 분석 기반의 FES 시스템이 보행 시 뇌졸중 환자의 족하수 개선에 미치는 영향: 사례 연구

The effect of lower limb muscle synergy analysis-based FES system on improvement of the foot drop of stroke patient during walking: a case study

임태현^{1*, 2}

Taehyun Lim^{1*, 2}

〈Abstract〉

Foot drop is a common symptom in stroke patients due to central nervous system (CNS) damage, which causes walking disturbances. Functional electrical stimulation (FES) is an effective rehabilitation method for stroke patients with CNS damage. Aim of this study was to determine the effectiveness of 6 weeks FES walking training based lower limb muscle synergy of stroke patients. Lower limb muscle synergies were extracted from electromyography (EMG) using a non-negative matrix factorization algorithm (NMF) method. Cosine similarity and cross correlation were calculated for similarity comparison with healthy subjects. In both stroke patients, the similarity of leg muscle synergy during walking changed to similar to that of healthy subjects due to a decrease in foot drop during. FES walking intervention influenced the similarity of muscle synergies during walking of stroke patients. This intervention has an effective method on foot drop and improving the gait performance of stroke patients.

Keywords : Waking rehabilitation, Stroke, Muscle synergy similarity, Functional Electrical Stimulation

1* 주저자: 임태현, 고려대학교 보건과학과 재활과학
2 교신저자: 임태현, 고려대학교 보건과학과 재활과학
E-mail: tuna27@korea.ac.kr

1*, 2: Major in Rehabilitation Science, Department of Health Science, Korea University

1. 서론

족하수(Foot drop)란 근육이나 신경의 손상으로 인하여 발이 아래로 쳐진 현상을 의미한다[2,4]. 특히 뇌졸중과 같이 중추 신경계(Central Nervous System, CNS)의 손상이 야기되면 발목 근육들을 지배하는 신경의 약화와 함께 발목 주위 근육들의 협응 능력이 현저히 떨어지게 되어 족하수를 유발하게 된다[1-3]. 이는 뇌졸중 환자의 흔한 특징 중에 하나이며 족하수로 야기된 하지 근육들의 협응 능력 변화는 뇌졸중 환자의 보행주기를 변화시키게 된다. 보행주기(Gait cycle)는 발이 지면에 닿아 있는 입각기와 보행주기 중에 발이 지면에서 떨어져야 하는 유각기로 나뉘는데 뇌졸중 환자는 발이 지면에서 떨어져야 하는 보행의 유각기에서 발이 지면에서 떨어지지 못하고 발을 지면에 끄는 보행양상을 나타낸다[4]. 이는 뇌졸중 환자들이 보행할 때 낙상 사고의 위험을 증가시키는 원인이 된다[5].

이러한 보행주기가 순차적으로 일어나려면 CNS로부터 근육까지 전달되는 복잡한 근육의 협응 패턴 능력이 필요하다. 여러 선행연구에 따르면 이러한 보행 패턴은 보행주기 단계별 근육들간의 정상적인 협응 패턴을 통해 수행된다고 보고된다. 이를 근육 시너지라고 하는데 일반적으로 정상 성인의 경우 한 보행주기 안에서 4개의 근육 시너지 패턴이 나타난다고 보고된다[6-7].

족하수 재활을 위한 여러 방법들 중의 하나로 기능적 전기 자극(Functional Electrical Stimulation, FES)이 있다. 이는 CNS 손상 환자들에게 저주파 자극을 통하여 근육의 수축 및 재교육의 목적으로 사용하는 전기치료 종류의 하나이다. 또한 FES는 운동 학습 능력을 향상시키고 CNS의 신경 가소성을 증진시킨다고 보고된다[6-8]. 하지만 병원에서 이루어지는 일반적인 형태의 FES 재활은 주로 앉

은 상태에서 전기자극을 주며 보행주기의 유각기에서 발이 지면에 떨어지는 것을 방지하기 위한 특정 근육에만 초점을 맞추고 수행된다. 뇌졸중 환자 보행의 특성은 매우 다양하게 나타나는데 이는 보행 시에 발현되는 족하수 환자 개개인의 병리적인 특성을 반영하지 못한다는 제한점이 있다 [5].

따라서, 본 연구는 보행 시에 발현되는 정상 성인의 하지 근육의 협응 능력과의 유사도 비교를 통하여 급성과 만성 뇌졸중환자 2명에서 나타나는 근육의 협응 문제점을 확인하고 이를 6주간의 FES 보행 훈련에 적용하였을 때 재활의 효과를 확인하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상

본 연구를 위해 발병 시점의 차이가 있는 뇌졸중 환자 2명을 모집하였다(Table 1). 또한 하지 근육의 협응 능력 비교를 위하여 연령대가 비슷한 건강한 정상 성인 13명을 모집하여 보행 시 하지 근육의 근전도 (Electromyography, EMG) 신호를 수집하였다. 본 연구에 참여한 모든 대상자는 실험과 관련된 정보와 절차에 대한 내용에 대한 설명을 들은 뒤에 자발적으로 참여의사를 밝히고 동의한 자로 선정하였다. 환자의 선정 기준은 보조

Table 1. Baseline characteristics of stroke patient

	Gender	Age	Paretic side	Onset
S1	Male	61	Right	16 months
S2	Male	59	Left	8 months

기구 없이 10M이상 독립보행이 가능하고, 근육의 경직정도를 확인하는 평가지표로 MAS(Modified Ashworth Scale)를 활용하여 보행시에 하지 경직의 문제가 없을 정도의 점수인 자를 대상으로 하였다. 또한 본 연구는 고려대학교 연구윤리 심의 위원회의 승인을 받았다 (KUIRB-2019-0020-01).

2.2 측정도구

정상인과 뇌졸중 환자의 하지 근육의 협응 능력 분석을 위해 근전도 전극들을 하지근육에 부착하였다. 근육의 부착 위치는 정상인의 경우 우 세측 다리에 부착하였으며 뇌졸중 환자의 경우 마비측 다리의 같은 위치에 부착하였다. 측정근육으로는 허벅지 앞쪽 부위의 근육인 큰모음근 (Adductor Magnus, AM), 곧은근(Rectus Femoris, RF), 안쪽 넓은근(Vastus Medialis, VM)에 부착을 하였고 허벅지 근육인 넓다리 두갈래근(Biceps Femoris, BF)과 반힘줄모양근(Semitendinosus, Sem), 엉덩관절 부위의 중간볼기근(Gluteus Medius, GM), 정강이 부위의 앞정강근(Tibialis Anterior, TA), 종아리 부위의 안쪽 장딴지근(Gastrocnemius Medialis, GM)이며 총 8개의 전극을 부착하였다. 1500Hz로 데이터를 얻어내며 이 데이터는 bandpass filter(3rd order Butterworth band: 40-400Hz), rectified, low pass filter(3rd order Butterworth cutoff: 5Hz)의 필터링 과정을 거쳤다. 발뒤꿈치가 지면에 닿는 순간부터 같은 발이 다시 지면에 닿을 때 까지를 보행주기의 1사이클이라고 하며 Foot switch를 발 뒤꿈치에 부착하여 지면에 발이 닿을 때 마다 얻어진 신호를 바탕으로 보행 주기를 나누었다. 마지막으로 정규화 과정을 거쳐 이 보행의 한 주기의 processed EMG를 ($EMG_{envelop}$)(8×100)으로 나타내었다.

2.3. 근육 협응 능력의 분석 방법

하나의($EMG_{envelop}$)(8×100)은 비음수행렬 분석 (Non-negative Matrix Factorization, NMF) 알고리즘을 활용하여 근육 시너지의 형태로 분해하였다[13]. 근육 시너지는 Muscle Weight(MW)와 Activation Profile(AP)로 구성되며 MW는 해당 시너지가 발현되는데 관여하는 근육들의 종류와 보행주기의 기여도 정도이며 AP는 해당 시너지가 시간에 따라 발현되는 정도이다.

$$EMG_{envelop}(8 \times 100) =$$

$$MW(8 \times 4) \cdot AP(4 \times 100) + error$$

정상인의 경우 한 보행주기 안에서 4개의 시너지가 발현되었는데 Weight acceptance 시너지의 경우 보행주기의 초기 입각기 즉, 처음 발 뒤꿈치가 지면에 닿는 순간이며 RF, VM, TA와 같은 하지 신진 근육들의 협응 양상을 나타낸다. Push off 시너지의 경우 발을 지면에서 밀치고 나아가는 순간이며 GCM과 같은 발바닥 굽힘근의 협응 양상을 나타낸다. Foot clearance 시너지의 경

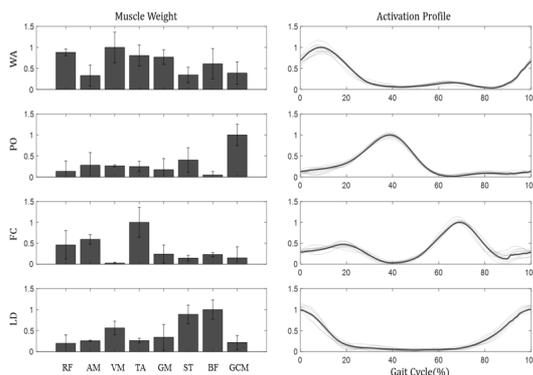


Fig. 1 General characteristic of lower limb muscle synergy in healthy subjects during walking

우 RF, AM, TA근육들이 협응 양상을 나타내며 공중에 발이 뜰 수 있도록 발목을 들어올리는 역할을 하게 된다. Leg deceleration시너지의 경우 ST, BF와 같은 허벅지 뒤쪽의 근육이 협응 양상을 나타내어 발 뒤꿈치가 지면에 닿을 수 있도록 감속 역할을 하게 된다[Fig 1].

2.4 FES 중재 방법

본 연구는 6주간 주 3회로 진행되었으며 1회당 20분간 8채널의 자극기를 이용하여 EMG를 부착하였던 같은 부위의 근육에 자극을 주었다. 중재 전 10분 동안은 FES를 부착하지 않은 채 워밍업으로 보행을 하였고 20분동안 FES자극을 받으며 편안한 속도로 보행을 하였다. 마지막 10분 동안은 중재 전과 마찬가지로 FES를 부착하지 않고 보행을 하였다. S1, S2 환자 모두 족하수에 영향을 미치는 근육인 TA부분에 대해 자극을 주었고 특히, S2는 Push Off 가 잘 일어나기 위하여 RF, VM 근육 부위에 FES amplitude를 강화하여 자극하였다.

2.5 근육 협응 능력의 유사도 비교

정상인과 뇌졸중 환자의 근육 협응 능력의 유사도 비교는 MW의 경우는 $MW_{Healthy}$ 와 MW_{stroke} 의 Cosine similarity, AP의 경우는 $AP_{Healthy}$ 와 AP_{stroke} 의 Cross correlation을 이용하여 비교하였다. Cosine similarity는 0.85를 넘지 않으면 해당 시너지는 유사하지 않다고 보며 Cross correlation 은 유사도가 0.85를 넘지 않거나 유사도가 최고가 되는 지점의 time-lag가 5이상의 차이가 발생하면 유사하지 않는다고 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 하지 근육 협응 능력의 변화

S1의 경우 만성 환자이며 중재전에 전체적으로 근육의 활성화가 낮은 양상을 보였다. 중재 이후 Weight acceptance 시너지에서 RF, TA, GM의 활성화도가 증가하였다. Push off 시너지는 전체 근육들의 활성화도 증가를 보였고 Foot clearance 시너지에서 RF, AM의 활성화도가 증가하였다. Leg deceleration 시너지에서는 BF와 MG의 활성화도가 감소하였다. S2의 경우 급성 환자이며 Weight acceptance 시너지에서 AM의 활성화도가 증가하였고 S1과 반대로 중재전에 전반적으로 근육의 활성화도가 높았다. 중재 후에는 정상 성인과 비슷하게 VM이 Push off 시너지에서 주요한 근육으로 자리잡았다. Push off 시너지와 Leg deceleration 시너지에서의 과한 활성화도가 중재 이후에 감소하였다 [Fig 2].

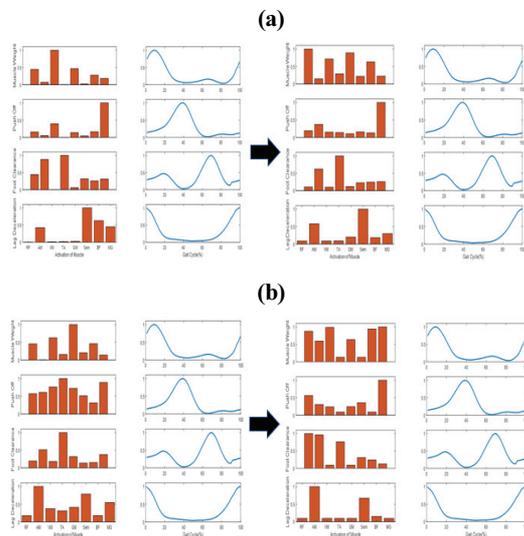


Fig. 2 Changes in lower limb muscle synergy in stroke patients after intervention (a)subject 1, (b)subject 2

3.2 하지 근육 협응 능력의 유사도 변화

S1의 유사도의 경우 Weight acceptance, Leg deceleration 모두 0.85보다 증가하였으며 Push Off의 경우 Activation Profile의 시간차가 중재 전 보다는 줄어들었다. S2의 경우 Push Off에서 유사도가 중재 이후에 0.85보다 증가하였으며 Leg Deceleration의 경우 Activation Profile의 보행주기의 유각기에서 초기 입각기로 감소되는 부분의 시간차가 정상인과 유사해졌다(Table 2).

Table 2. Comparison of muscle synergy similarity between healthy subjects and stroke patients, bold values are lower than threshold (0.85), and values in parentheses indicate values changed after intervention

	WA	PO	FC	LD
Subject 1				
Similarity	0.8406 (0.9202)	0.8993	0.9647	0.8373 (0.9262)
Correlation	0.9723	0.8417 (0.9658)	0.9691	0.9498
Subject 2				
Similarity	0.8705	0.8165 (0.9610)	0.9512	0.9838
Correlation	0.9134	0.9394	0.9343	0.5828 (0.8976)

4. 결론

족하수는 뇌졸중 환자 보행주기의 유각기 동안 발을 끌게 만들어 에너지소모가 많이 발생하는 비효율적인 보행일 뿐만 아니라 낙상의 위험도 증가한다. 족하수를 치료하는 방법 중 하나는 전기치료의 한 형태인 FES 치료인데 이는 중추신경계 손상으로 인하여 손상 받은 신경전도로에 저주파

자극을 주어 근육의 수축 및 근재교육의 역할을 한다[10-13].

최근 들어 뇌졸중 환자마다 다르게 발현되는 보행 패턴과 다양한 보행 재활 중재에 대하여 환자마다 다른 효과의 차이 때문에 기존과는 다른 새로운 방식의 중재가 요구된다. 환자의 보행 패턴을 육안으로 관찰하고 사용되는 측정값들처럼 주로 질적인 분석에 국한되어 왔으며 전체적인 환자의 운동에 초점을 맞추기 때문에 보행주기마다 다르게 발현되는 환자마다 다른 개개의 보행 특징들을 반영하기 어렵다[4,9]. 따라서 개개인마다 다른 보행의 양상을 평균화하기 보다는 개개인마다 발현되는 특징적인 근육 시너지를 개별적으로 분석하여 재활할 수 있는 양적인 연구가 주목을 받고 있다[6].

두 환자 모두 공통적으로 족하수가 있었으며 TA 근육의 낮은 활성화도 양상을 보였다. S1환자의 경우 FES 중재전에 전반적으로 근육의 가중치들이 정상 성인에 비하여 더 적게 활성화되는 경향을 보이는데 이는 18개월의 만성적인 기간동안 근육의 협응 능력들의 가변성이 없는 상태로 근육에 대한 신경지배가 줄어들었음으로 사료된다. 중재 이후 Weight acceptance 시너지에서 RF와 TA근육의 활성화도가 증가하여 정상 성인과 유사도가 비슷하게 바뀌었다. Leg deceleration 시너지에서 정상 성인과의 유사도의 차이가 있었는데 마찬가지로 TA근육에 문제가 많이 발생하였으며 중재 이후 유각기에서 초기 입각기까지 중에서 허벅지 근육들의 활성화가 정상인의 유사도가 비슷해졌다. S2 환자의 경우 보행 중에 나타나는 족하수의 특징중의 하나인 Push off시에 발현되는 족저 굴곡근의 빠른 활성화도는 보행주기의 Push off와 Foot clearance에서 병합된 근육의 시너지의 형태로 나타났는데 Push off와 Foot clearance 시너지에서 병합되어 활성화가 컸던 유사도가 6주간의

중재 이후에 크게 줄어 정상 성인과 비슷하게 바뀌었다. 특히 Push off 시너지에서 족저 굴곡근의 초기활성화 패턴이 감소하는 양상을 보였다. 이는 근육 협응 능력의 개선을 의미하며 병리적인 시너지가 FES 보행중재를 통해 족하수가 감소하고 정상 성인의 보행 시 시너지와 유사하게 바뀌었다는 점을 시사한다[13-15].

결론적으로 본 연구에서 수행한 하지 근육의 협응 능력 분석기반의 FES 보행 중재를 통하여 족하수가 있는 뇌졸중 환자의 보행 시 기능개선에 효과가 있음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 짧은 중재기간에도 불구하고 뇌졸중 환자의 족하수 보행의 기능개선에 있어 효과적인 중재임을 검증하였다. 본 연구의 제한점은 적은 대상자 수와 성별이 모두 남자 환자였다는 점이 연구의 결과를 일반화하기 어렵다는 것이다. 추후 연구에서는 성별의 고려와 함께 중재 이후의 후속연구도 함께 진행하여 신경 손상 이후에 어느 정도의 재활기간이 환자에게 필요한지도 함께 고려 되어야 한다는 점을 시사한다.

참고문헌

- [1] Clark, D. J., Ting, L. H., Zajac, F. E., Neptune, R. R., & Kautz, S. A. (2009). Merging of healthy motor modules predicts reduced locomotor performance and muscle coordination complexity post-stroke. *Journal of neurophysiology*, 103(2), 844-857.
- [2] Safavynia, S., Torres-Oviedo, G., & Ting, L. (2011). Muscle synergies: implications for clinical evaluation and rehabilitation of movement. *Topics in spinal cord injury rehabilitation*, 17(1), 16-24.
- [3] Cheng, J. S., Yang, Y. R., Cheng, S. J., Lin, P. Y., & Wang, R. Y. (2010). Effects of combining electric stimulation with active ankle dorsiflexion while standing on a rocker board: a pilot study for subjects with spastic foot after stroke. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 91(4), 505-512.
- [4] Hollands, K. L., Pelton, T. A., Tyson, S. F., Hollands, M. A., & van Vliet, P. M. (2012). Interventions for coordination of walking following stroke: systematic review. *Gait & Posture*, 35(3), 349-359.
- [5] Routson, R. L., Clark, D. J., Bowden, M. G., Kautz, S. A., & Neptune, R. R. (2013). The influence of locomotor rehabilitation on module quality and post-stroke hemiparetic walking performance. *Gait & posture*, 38(3), 511-517.
- [6] Ferrante, S., Chia Bejarano, N., Ambrosini, E., Nardone, A., Turcato, A. M., Monticone, M., ... & Pedrocchi, A. (2016). A personalized multi-channel FES controller based on muscle synergies to support gait rehabilitation after stroke. *Frontiers in neuroscience*, 10, 425.
- [7] Meng, L., Porr, B., Macleod, C. A., & Gollee, H. (2017). A functional electrical stimulation system for human walking inspired by reflexive control principles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of engineering in medicine*, 231(4), 315-325.
- [8] Sheffler, L. R., & Chae, J. (2007). Neuromuscular electrical stimulation in neurorehabilitation. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 35(5), 562-590.
- [9] Kim, W. H. (2006). The effects of clinical characteristics of chronic stroke patients on physiological cost index during walking. *Physical Therapy Korea*, 13(1), 32-37.
- [10] Chae, J., Sheffler, L., & Knutson, J. (2008). Neuromuscular electrical stimulation for motor restoration in hemiplegia. *Topics in stroke rehabilitation*, 15(5), 412-426.
- [11] Do, A. H., Wang, P. T., King, C. E., Schombs, A., Cramer, S. C., & Nenadic, Z. (2012, August). Brain-computer interface controlled functional electrical stimulation device for foot

- drop due to stroke. In 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (pp. 6414-6417). IEEE.
- [12] L. H., Chiel, H. J., Trumbower, R. D., Allen, J. L., McKay, J. L., Hackney, M. E., & Kesar, T. M. (2015). Neuromechanical principles underlying movement modularity and their implications for rehabilitation. *Neuron*, 86(1), 38-54.
- [13] Lee, D. D., & Seung, H. S. (1999). Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. *Nature*, 401(6755), 788.
- [14] Kwan, M. S. M., Hassett, L. M., Ada, L., & Canning, C. G. (2019). Relationship between lower limb coordination and walking speed after stroke: an observational study. *Brazilian journal of physical therapy*, 23(6), 527-531.
- [15] Saito, A., Tomita, A., Ando, R., Watanabe, K., & Akima, H. (2018). Similarity of muscle synergies extracted from the lower limb including the deep muscles between level and uphill treadmill walking. *Gait & posture*, 59, 134-139.

(접수: 2020.05.04. 수정: 2020.06.01. 게재확정: 2020.06.08.)