

Effect of Functional Electrical Stimulation on Balance and Gait Speed of Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis

Hyun Jin Jang, So Yeong Kim, Jong Yun Chun, Gi Bbeum Choi, Woon Su Cho, Jae Hyun Lim

Department of Physical Therapy, Nambu University, Gwangju, Republic of Korea

Purpose: This study analyzed the effects of functional electrical stimulation (FES) on the balance and gait speed of stroke patients. Also, the effects were analyzed according to the measurement method and electrical stimulation site.

Methods: The selection criteria included randomized controlled trials that measured balance and gait speed using FES in adult stroke patients of any type and excluded studies that had no data, were not in English or Korean, or those for which the full text could not be found. Searches were conducted in PubMed, Cochrane Library, RISS, DBpia, and ScienceON until March 2024, and the risk of bias was assessed using the PEDro scale. The effect size was expressed as the standardized mean difference (SMD) using a random effects model and a 95% confidence interval (CI), and the effect based on the electrical stimulation site was analyzed by subgroup analysis.

Results: A total of 577 subjects from 19 studies were included. The results of analyzing the effect of FES showed that it significantly improved Berg Balance Scale (BBS) (SMD=0.42; CI=0.11-0.73; $I^2=60\%$) and Timed Up and Go test (TUG) scores (SMD=0.36; CI=0.15-0.57; $I^2=0\%$), but not gait speed (SMD=-0.11; CI=-0.46-0.24; $I^2=37\%$). In addition, electrical stimulation was found to be more effective when stimulating the ankle than when stimulating various areas, including the ankle.

Conclusion: In stroke patients, FES has shown positive effects on balance. Future studies could emphasize interventions combined with FES to achieve better results. Studies conducted with varied stimulation sites are needed to determine the impact of FES on activity levels.

Keywords: Stroke, Functional electrical stimulation, BBS, TUG, Gait speed

서론

뇌졸중은 뇌혈관이 막히거나, 혈관이 터져 나타나는 뇌혈관 질환이다.¹ 뇌졸중은 보행 패턴의 기능 장애와 이동성 감소로 인해서 일상생활 활동의 제한을 초래하기 때문에 뇌졸중 재활의 핵심적인 목표는 보행 능력을 회복하는 것이다.² 그중 발처짐(foot drop)은 뇌졸중 환자가 겪는 다양한 장애 중에서 가장 흔하며 운동 장애, 발바닥 굽힘의 경직 증가, 발등 굽힘의 약화와 같은 원인으로 인해 나타난다.³ 따라서, 이러한 뇌졸중으로 인한 발처짐은 뇌졸중 환자가 보행할 때의 속도와 안정성 및 효율성이 감소하며 낙상의 위험을 증가시키게 된다.^{2,4}

발처짐 환자에게 기능적 전기 자극(functional electrical stimulation, FES)은 보행주기 단계에서 하부 운동 신경을 자극해주는 효과적인 중재 방법으로 입증되었다.⁵ FES는 근육이 수축할 때 서기와 걷기 같

은 기능적인 움직임을 만들 수 있도록 전기 자극을 근육에 적용해 움직임을 만들어 주는 역할을 한다.⁶ 또한, FES는 걸질 흥분성과 감각-운동 걸질로의 관류를 증가시켜 뇌졸중 후 기능 회복의 목표인 신경 가소성을 유도할 수 있으며 이러한 기전은 신경 재활에 핵심적인 역할을 한다.⁷ 이처럼, 표면 전극을 사용한 FES는 환자가 능동적인 움직임 훈련을 하는 동안 전기 자극을 통해 운동 재학습에 도움을 주는 치료법으로 수의적 움직임 조절이 가능한 뇌졸중 환자의 마비된 근력과 보행의 성능을 개선하는 재활 기술로 임상에서도 많이 사용되고 있다.⁸

최근까지 FES의 효과를 분석하기 위한 메타분석 선행 연구들이 진행되었다. Howlett 등⁹은 훈련 시 FES의 적용 유무가 활동성과 보행 속도에 미치는 효과에 대해 분석했으며 Mahmoudi 등¹⁰은 뇌졸중 환자의 균형 개선에 운동 요법 중재와 운동과 FES를 같이 적용했을 때

Received July 19, 2024 Revised August 12, 2024

Accepted August 19, 2024

Corresponding author Jae Hyun Lim

E-mail jhjoss@naver.com

Copyright ©2024 The Korean Society of Physical Therapy

This is an Open Access article distribute under the terms of the Creative Commons Attribution Non-commercial License (<https://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.

의 효과를 분석했다. 이처럼 FES가 균형이나 보행에 미치는 효과를 분석하기 위한 메타분석들이 진행되고 있다. 또한, Jaqueline da Cunha 등³의 연구에서는 FES를 종아리 신경에 적용했을 경우 보행속도, 이동성, 균형 등에 미치는 효과를 분석했다. 하지만, FES의 부착 부위에 따른 효과를 비교한 연구는 진행되지 않았다.

따라서, 본 체계적 고찰 및 메타분석의 목적은 뇌졸중 환자에게 FES를 적용한 그룹과 적용하지 않은 무작위 대조군 연구(Randomized controlled trials, RCT)를 수집해 균형과 보행속도에 미치는 효과를 분석하고 발목에만 FES를 적용했을 경우와 발목을 포함한 다른 부위에 FES를 적용했을 경우의 부착부위에 따른 효과를 비교하는 것이다.

연구 방법

1. 연구절차

본 체계적 고찰 및 메타분석은 FES가 뇌졸중 환자의 균형과 보행 속도에 미치는 효과를 분석하기 위해 진행되었으며, PRISMA (The Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) 2020의 지침에 따랐다.¹¹

2. 연구 포함기준 및 제외기준

메타분석의 포함기준은 다음과 같다. (1) 모든 유형의 성인 뇌졸중 환자, (2) FES를 증재한 연구, (3) 비교군이 FES를 제외한 모든 증재를 적용한 연구, (4) 1차 결과인 균형을 측정하는 버그 균형 척도(berg balance scale, BBS)와 일어서서 걷기 검사(timed up and go test, TUG) 그리고 2차 결과인 보행 속도를 측정하는 걷기 검사(walking test, WT)를 측정한 연구, (5) RCT인 경우 메타분석에 포함되었다. 제외기준으로는 (1) 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)가 제공되지 않은 연구, (2) 영어와 한글을 제외한 다른 언어, (3) 원문을 찾을 수 없는 경우 메타분석에서 제외했다.

본 연구에서 선정한 측정 방법으로는 BBS, TUG, 걷기 검사(walking test, WT)를 포함했다. BBS는 다양한 상태와 장애를 가진 사람의 균형을 평가하는 척도로 14개의 항목으로 구성되어 있는데, 항목마다 0점부터 4점까지 점수를 매기며 총 점수는 56점으로 점수가 높을수록 균형 감각이 좋다는 것을 의미한다.¹² TUG는 동적 균형과 기능적 이동성을 측정하는 가장 널리 사용되는 검사로 대상자가 의자에서 일어나 3m를 걷고 돌아서서 다시 의자에 앉는 시간을 측정하는 방법이다.¹³ WT는 보행속도를 측정하는 방법이며 가장 표준적인 방법은 10m를 걷는 동안의 시간을 재는 것이다.¹⁴ 본 연구에서는 10m뿐만 아니라 모든 거리의 시간을 재는 WT를 수집했다.

3. 검색 전략

검색은 부울 연산자와 키워드의 조합을 통해 검색했다. 검색 기간은 처음부터 2024년 3월 17일까지 PubMed, Cochrane Library, RISS, DBpia, ScienceON 총 6개의 데이터베이스(Database)를 통해 자료를 검색했다. 국외 검색식은 (“Stroke”[Mesh] OR “Stroke”[TIAB]) AND (“Functional electrostimulation”[TIAB] OR “Functional electrical stimulation”[TIAB] OR “Functional electric stimulation”[TIAB] OR “FES”[TIAB])를 사용했고, 국내 검색식은 뇌졸중, 기능적 전기자극, 기능적 전기자극 치료, FES를 사용했다.

4. 연구의 질 평가

연구의 질을 평가하기 위해 PEDro (Physiotherapy Evidence Database) 척도를 사용했다. PEDro 척도는 RCT의 질을 평가하는 신뢰할 수 있는 척도이다.¹⁵ PEDro Scale의 평가 항목은 총 11개로 구성되어 있으며 포함 기준, 무작위와 눈가림 그룹 배정, 기준선 비교 가능성, 참가자/치료사/평가자 눈가림, 85% 이상의 측정값 획득, 치료 의도 분석(intention-to-treat), 그룹 간 통계 비교 제공, 점 측정과 변동성 측정 제공 등을 평가한다. 외부타당성을 평가하는 1번 항목을 제외한 나머지 2-11번을 평가해 점수에 포함시켰다.

총 점수는 10점이며 4점 미만은 ‘poor’, 4-5점은 ‘fair’, 6-8점은 ‘good’, 9-10점은 ‘excellent’로 평가했다.¹⁶ 평가는 두 명의 연구자(SY, JY)가 독립적으로 평가한 후 결과를 비교했다. 의견이 일치하지 않을 경우 다른 연구자와 함께 논의를 통해 결정했다.

5. 자료 추출

자료의 추출은 Excel 2023을 사용했다. 수집한 자료는 (1) 연구 제목, 출판 연도, 1저자, (2) 대상자의 성별, 나이, 뇌졸중 발병일, (3) FES 전기 자극 부위, 전기 자극 방법, (4) 실험군과 비교군 증재 방법, (5) BBS, TUG, 보행 속도 중에서 사용한 측정 종류, (6) 치료군과 대조군의 치료 전, 후 평균값과 표준편차 값을 수집했다. 자료의 수집은 두 명의 연구자(JH, GB)가 각각 수집한 후 결과를 비교했다. 의견이 일치하지 않은 경우 다른 연구자와 함께 논의를 통해 결정했다.

6. 자료 분석

뇌졸중 환자의 균형과 보행속도에 FES가 미치는 효과를 분석하기 위한 메타분석을 위해 Rstudio 4.3.3을 사용했다. 포함된 연구는 대상자, 증재 방법과 기간 등이 다양했기 때문에 무작위 효과 모형(random effect model)을 선택했다. 수집한 자료는 연속형 자료였으며 분석을 위해 각 연구의 증재 전후의 평균(mean)과 표준편차(standard deviation) 값으로 표준화된 평균 차이(standardized mean difference)와 95% 신뢰구간(confidence interval)을 계산했다. 추가적으로 발목에만 전기

자극을 했을 경우와 발목을 포함한 다른 부위에 전기 자극을 했을 때의 FES 효과를 비교 분석하기 위해 하위그룹(subgroup analysis) 분석을 실시했다. 이질성은 I² 통계 방법을 사용해 나타냈으며 수집을 통해 포함된 연구가 10개 이상일 경우 출판 편향을 분석하기 위해서 에거의 회귀분석(Egger's regression)을 진행했다. 결과 값을 일정하게 나타내기 위해 음의 값인 TUG와 보행 속도는 양의 값으로 수정해 결과를 나타냈다.

연구 결과

1. 선정된 연구

1,292개의 연구를 검색을 통해 확인했다. 352개의 중복 논문을 제외한 후 제목과 초록을 통해 본 체계적 고찰의 목적과 관련이 없는 895개의 연구를 제외해 45개의 연구의 전문을 확인했다. 그중 26개의 연구가 포함 기준을 충족하지 못해 최종적으로 19개의 연구가 선정되었다(Figure 1).¹⁷⁻³⁵

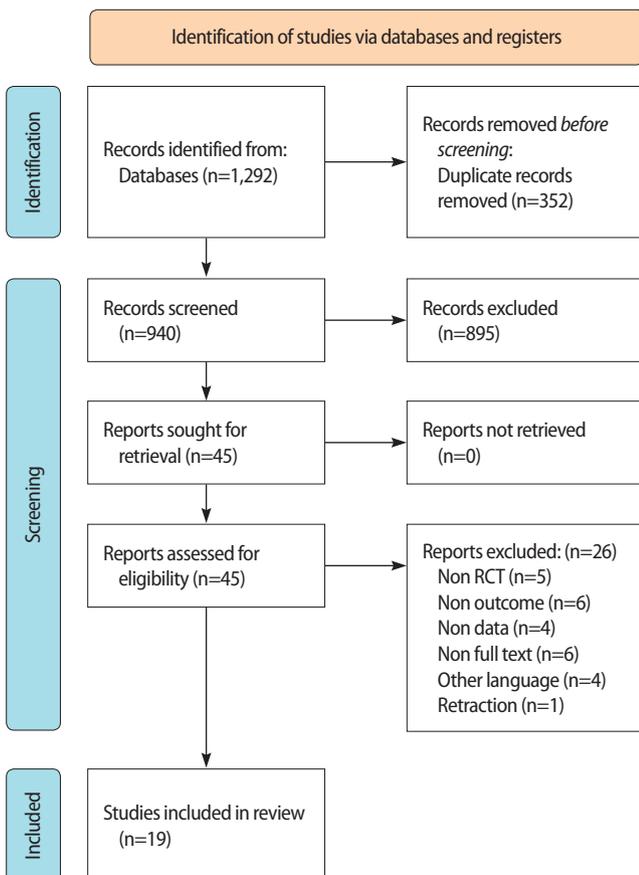


Figure 1. Flow chart

2. 포함된 연구의 일반적 특성

19개의 연구에서 총 577명의 대상자를 포함했다(Table 1). 연구에 포함된 대상자의 수는 8-68명이었으며 나이는 52-73살까지 포함되었다. 또한, 뇌졸중 발생 시기는 급성에서 만성까지 다양하게 포함되었다. FES의 전기 자극 부위에서 발목 작용에만 관련해서 전기 자극을 적용한 연구가 12개^{18-20,23,25,27,29-33,35}, 발목을 포함한 다른 부위를 함께 전기 자극을 적용한 연구는 8개였다.^{12,16,17,19,21,23,26,29} 측정 방법에서 BBS를 측정하는 연구는 15개^{17,19-24,26-29,31-33,35}였으며 TUG는 11개^{18-20,23-25,29,30,32,34,35}, 보행 속도를 측정하는 연구는 7개였다.^{21,25-27,30,32,35} 보행 속도 평가에서 측정 거리는 10m에서 5m까지 다양한 거리에서 속도를 측정했다.

3. 연구의 질 평가

PEDro 척도로 연구의 질을 평가한 결과 9개의 연구^{18,20-22,25,28,30,31,33}가 Poor, 10개^{17,19,23,24,26,27,29,32,34,35}의 연구가 Good이었다(Table 2). 포함된 연구들의 질 평가 등급은 Poor 등급에서 Good 등급으로 연구의 질은 전체적으로 양호한 것으로 나타났다.

4. 균형과 보행속도

총 538명의 실험군과 549명의 비교군이 포함되었다. 15개의 연구에서 BBS, 11개의 연구에서 TUG 그리고 7개의 연구에서 보행속도를 평가했다(Figure 2). 음적 변수인 TUG와 보행속도는 양적으로 변환해 분석했다. 그 결과 BBS (SMD = 0.42; CI = 0.11-0.73; I² = 60%)와 TUG (SMD = 0.36; CI = 0.15-0.57; I² = 0%)에서 유의한 개선이 나타났으며 WT에서는 유의한 개선이 나타나지 않았다(SMD = -0.11; CI = -0.46-0.24; I² = 37%).

5. 전기 자극 부위

FES의 전기 자극 부위에 따른 효과를 알아보기 위해 하위요인 분석을 실시했다(Figure 3). 그 결과 발목을 포함한 다른 부위와 함께 전기 자극을 했을 경우 유의한 개선이 나타나지 않았다(SMD = -0.06; CI = -0.33-0.21; I² = 26%). 하지만, 발목에만 전기 자극을 했을 경우에는 유의한 개선이 나타났다(SMD = 0.45; CI = 0.24-0.65; I² = 45%).

6. 출판 편향

출판 편향을 분석하기 위해 회귀분석 검정(Egger's regression test)을 실시했다. 분석 결과 효과크기와 표준오차가 관계없다는 귀무 가설을 기각하지 못했다(t = -0.48, df = 40, p-value = 0.6322). 따라서, 본 연구에서는 출판 오류가 없는 것으로 나타났다.

Table 1. General characteristics

No.	Study	Sex = Males/ Females (N)	Age (years) = M (SD)	Onset = M (SD)	FES		Intervention	Outcome
					Electrical stimulation site	Electro stimulation		
1	Ambrosini E et al., 2020 ¹⁷	Total=68 IG=21/13 CG=17/17	IG=73.7 (11.7) CG=74.9 (12.8)	Day IG=13.9 (5) CG=18 (14.3)	- Quadriceps - Hamstring - Gastrocnemius - TA	- 400µs - 20Hz	IG: FES+cycling+bio feedback CG: conventional physical therapy 5 weeks/5 times a week/20 min	BBS
2	Ha SY et al., 2020 ¹⁸	Total=25 IG=9 CG1=8 CG2=8	No information	Month IG=27 (28.4) CG1=26.9 (25.1) CG2=44.3 (28.8)	- TA - Gastrocnemius	- 250µs - 40Hz - 20-40mA	IG: ankle strategy exercise+ functional electrical stimulation CG1: ankle strategy exercise+sham functional electrical stimulation CG2: conventional physical therapy 8 weeks/5 times a week/30 min	TUG
3	Lee KJ., 2020 ¹⁹	Total=49 IG=17/8 CG=15/9	IG=62.16 (8.13) CG=64.88 (10.35)	Month IG=16 (6.49) CG=15.25 (6.89)	- Gastrocnemius - TA	- 300µs - 30-35Hz - 16-18mA	IG: balance training with EMG- triggered FES CG: balance training without EMG- triggered FES 6 weeks/5 times a week/40 min	BBS TUG
4	Sharif F et al., 2017 ²⁰	Total=38 IG=19 CG=19	20-70	Subacute	- Common peroneal nerve - TA	- 7 to 365µs - 40Hz - 10-80mA	IG: FES+conventional physical therapy CG: EMS+conventional physical therapy 4-6 weeks/5 times a week	BBS TUG
5	Tong RK et al., 2006 ²¹	Total=50 IG=10/5 CG1=9/6 CG2=12/8	IG=61.8 (10.8) CG1=66.1 (9.9) CG2=71.4 (14)	Week IG=2.3 (1) CG1=2.7 (1.3) CG2=2.7 (1.2)	- Quadriceps - Common peroneal nerve	Muscle correct functional response	IG: electromechanical gait trainer+FES CG1: electromechanical gait trainer CG2: overground gait training 4 weeks/5 times a week/20 min	BBS 5mWT
6	Shim J et al., 2020 ²²	Total=33 IG=10/7 CG=9/7	IG=59.65 (16.52) CG=56 (15.61)	Month IG=11.59 (5.9) CG=13.88 (5.51)	- Latissimus dorsi - Oblique muscle	- 200µs - 35Hz - 10-20mA	IG: EMG-triggered FES during PNF trunk pattern CG: PNF trunk pattern group 4 weeks/5 times a week/30 min	BBS
7	Bae YH et al., 2014 ²³	Total=20 IG=6/4 CG=7/3	IG=45.4 (19.7) CG=52 (16.1)	Month IG=9.8 (6) CG=11.5 (5.1)	- Dorsiflexor - Peroneal nerve	No information	IG: FES+RAGT CG: RAGT 5 weeks/3 times a week/30 min	BBS TUG
8	Hong J et al., 2018 ²⁴	Total=10 IG=3/2 CG=3/2	IG=61 (4.58) CG=63.33 (6.02)	Month IG=14.33 (3.51) CG=12.67 (2.08)	- Rectus abdominis - External oblique	- 250ms - 50Hz	IG: FES CG: Placebo 4 weeks/5 times a week/15 min	BBS TUG
9	Wang GS et al., 2012 ²⁵	Total=27 IG=14 CG=13	IG=54.1 (8.6) CG=58.9 (6.7)	Month IG=13.9 (9.2) CG=16.1 (9)	- TA - Common peroneal nerve	- 100µs - 25Hz - 0.5-1 sec	IG: FES+partial body weight support CG: general exercise groups	TUG 6mWT
10	Kunkel D et al., 2013 ²⁶	Total=21 IG=4/3 CG1=4/3 CG2=4/3	IG=64 (15.5) CG1=71.1 (18.8) CG=70 (10.6)	4.6 (min tomAx: 1-14) weeks post onset	- Quadriceps femoris - GluteusMaximus	- 40Hz - 17.8-35mA - Average pulse width of 162mS	IG: FES administered in the context of a balance training program CG1: balance training program on its own CG: usual care	BBS 10mWT
11	Dujović SD et al., 2017 ²⁷	Total=8 IG=3/5 CG=7/1	(<65/>65 years) IG=6/2 CG=6/2	(<6/>6 months) IG=6/2 CG=2/6	- Tibial nerve - Common peroneal nerve	- 40Hz - Pulse width to 400 sec	IG: bobath approach FES therapy CG: bobath approach 4 weeks/5 times a week/20-40 min	BBS 10mWT
12	Lee SY et al., 2013 ²⁸	Total=16 IG=8/8 CG=8/8	IG=63.25 (15) CG=63.25 (14.12)	Day IG=62.5 (52.23) CG=57.38 (34.63)	- Quadriceps - TA - Hamstring - GluteusMaximus	- 60Hz - 300ms - Duty cycle of 1.0 sec	IG: FES+ergometer CG: ergometer 4 weeks/5 times a week/30 min	BBS
13	Lee HJ et al., 2013 ²⁹	Total=30 IG=12/3 CG=10/5	IG=52.47 (9.41) CG=56.73 (7.24)	Month IG=4 (0.41) CG=4.07 (1.03)	- TA	- Threshold intensity	IG: body weight support treadmill training combined with functional electrical stimulation CG: body weight support treadmill training combined with functional electrical stimulation 4 weeks/5 times a week/30 min	BBS TUG
14	Koh S et al., 2021 ³⁰	Total=42 IG=12/4 CG1=8/4 CG2=12/2	IG=51.25 (0.86) CG1=50.5 (9.08) CG2=54.14 (11.02)	Month IG=14.81 (5.67) CG1=16.92 (5.67) CG2=17.71 (7.43)	- TA	- Electrical stimulation without patients complains	IG: stair climbing training with functional electrical stimulation CG1: stair climbing training CG2: conventional physical therapy 4 weeks/3 times a week/30 min	TUG 10mWT

(Continued on next page)

Table 1. Continued

No.	Study	Sex = Males/Females (N)	Age (years) = M (SD)	Onset = M (SD)	FES		Intervention	Outcome
					Electrical stimulation site	Electro stimulation		
15	Cho MK et al., 2015 ³¹	Total=31 IG1=7/3 IG2=7/3 CG=5/6	IG1=57 (9.1) IG2=53.3 (9.2) CG=57.8 (7.9)	Month IG1=22.5 (12.6) IG2=22.5 (14.1) CG=21.6 (6.7)	CG1=TA, gluteus medius CG2=TA	- Muscle action without pain	IG1: treadmill training with FES applied to the GM and TA muscles IG2: treadmill training with FES applied to the TA muscles CG: treadmill training 4 weeks/5 times a week/30 min	BBS
16	Hwang DY et al., 2015 ³²	Total=30 IG=9/6 CG=8/7	IG=50 (7.55) CG=49.47 (5.01)	Day IG=192.53 (18.79) CG=194.07 (18.95)	- Common peroneal nerve - TA	- 150µs - 25Hz - 60-150V	IG: treadmill training combined with Tilt Sensor Functional electrical stimulation CG: treadmill training combined with Placebo Tilt Sensor Functional electrical stimulation 4 weeks/7 times a week/30 min	BBS TUG 10mWT
17	Jeon GY et al., 2014 ³³	Total=29 IG=6/4 CG1=5/4 CG2=7/3	IG=51.1 (9.98) CG1=47.33 (10.98) CG2=49.2 (6.1)	Month IG=23.5 (12.19) CG1=25.88 (11.25) CG2=37.7 (17.01)	- TA	- 300µs - 30Hz	IG: FES+progressive speed treadmill CG1: progressive speed treadmill CG2: self-selected speed treadmill 2 weeks/5 times a week/20 min	BBS
18	Hong JY et al., 2019 ³⁴	Total=30 IG=8/7 CG=6/9	IG=61.67 (7.22) CG=63.53 (9.68)	Month IG=13.73 (2.28) CG=14.4 (2.29)	- Rectus abdominis - External oblique	- 250µs - 50Hz	IG FES+virtual reality program EG: placebo+virtual reality program 6 weeks/15 min	TUG
19	Lee SH et al., 2009 ³⁵	Total=20 IG=9/1 CG=6/4	IG=55.30 (7.18) CG=56.90 (10.18)	Month IG=15.90 (8.33) CG=13.10 (12.01)	- Common peroneal nerve - TA	- 25Hz - 35pps - 0.2-0.4 sec	IG: FES+treadmill EG: placebo+treadmill 6 weeks/5 times a week/20 min	BBS TUG 10mWT

IG: intervention group, CG: control group, FES: Functional electrical stimulation, TA: tibialis anterior, EMG: electromyography, EMS: Electrical muscle stimulation, RAGT: robotic assisted gait training, BBS: Berg balance scale, TUG: timed up and go, 5mWT: 5-meter walk test, 10mWT: 10-meter walk test.

Table 2. PEDro scale

No.	Study	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
1	Ambrosini E et al., 2020 ¹⁷	-	O	O	O	O	X	X	O	X	O	O	7
2	Ha SY et al., 2020 ¹⁸	-	O	X	O	X	X	X	X	X	O	O	4
3	Lee KJ, 2020 ¹⁹	-	O	X	O	X	O	O	O	O	O	O	8
4	Sharif F et al., 2017 ²⁰	-	O	X	O	X	X	X	X	X	O	O	4
5	Tong RK et al., 2006 ²¹	-	O	X	O	X	X	X	O	X	O	O	5
6	Shim J et al., 2020 ²²	-	O	X	O	O	X	X	X	X	O	O	5
7	Bae YH et al., 2014 ²³	-	O	O	O	X	X	O	X	O	O	O	7
8	Hong J et al., 2018 ²⁴	-	O	X	O	O	X	X	X	O	O	O	6
9	Wang GS et al., 2012 ²⁵	-	O	X	O	X	X	X	X	O	O	O	5
10	Kunkel D et al., 2013 ²⁶	-	O	O	O	X	X	O	X	O	O	O	7
11	Dujović SD et al., 2017 ²⁷	-	O	X	O	X	X	O	O	O	O	O	7
12	Lee SY et al., 2013 ²⁸	-	O	X	O	X	X	X	X	O	O	O	5
13	Lee HJ et al., 2013 ²⁹	-	O	O	O	X	X	O	O	X	O	O	7
14	Koh S et al., 2021 ³⁰	-	O	X	O	X	X	X	X	X	O	O	4
15	Cho MK et al., 2015 ³¹	-	O	X	O	X	X	X	X	O	O	O	5
16	Hwang DY et al., 2015 ³²	-	O	O	O	X	X	O	O	X	O	O	7
17	Jeon GY et al., 2014 ³³	-	O	X	O	X	X	X	X	O	O	O	5
18	Hong JY et al., 2019 ³⁴	-	O	X	O	X	X	X	O	O	O	O	6
19	Lee SH et al., 2009 ³⁵	-	O	X	O	O	X	X	O	X	O	O	6

고찰

본 연구는 FES가 뇌졸중 환자의 균형과 보행속도에 미치는 영향을 분석하기 위해 체계적 고찰 및 메타분석을 실시했다. 그 결과 총 19편

의 연구가 선정되었으며 FES는 뇌졸중 환자의 균형을 평가하는 BBS와 TUG에서 유의한 개선이 나타났으며 보행속도를 평가하는 WT에서는 유의한 개선이 나타나지 않았다. 또한, 전기 자극 부위에 따른 효과를 분석하기 위해 하위그룹 분석을 진행한 결과 발목을 포함해

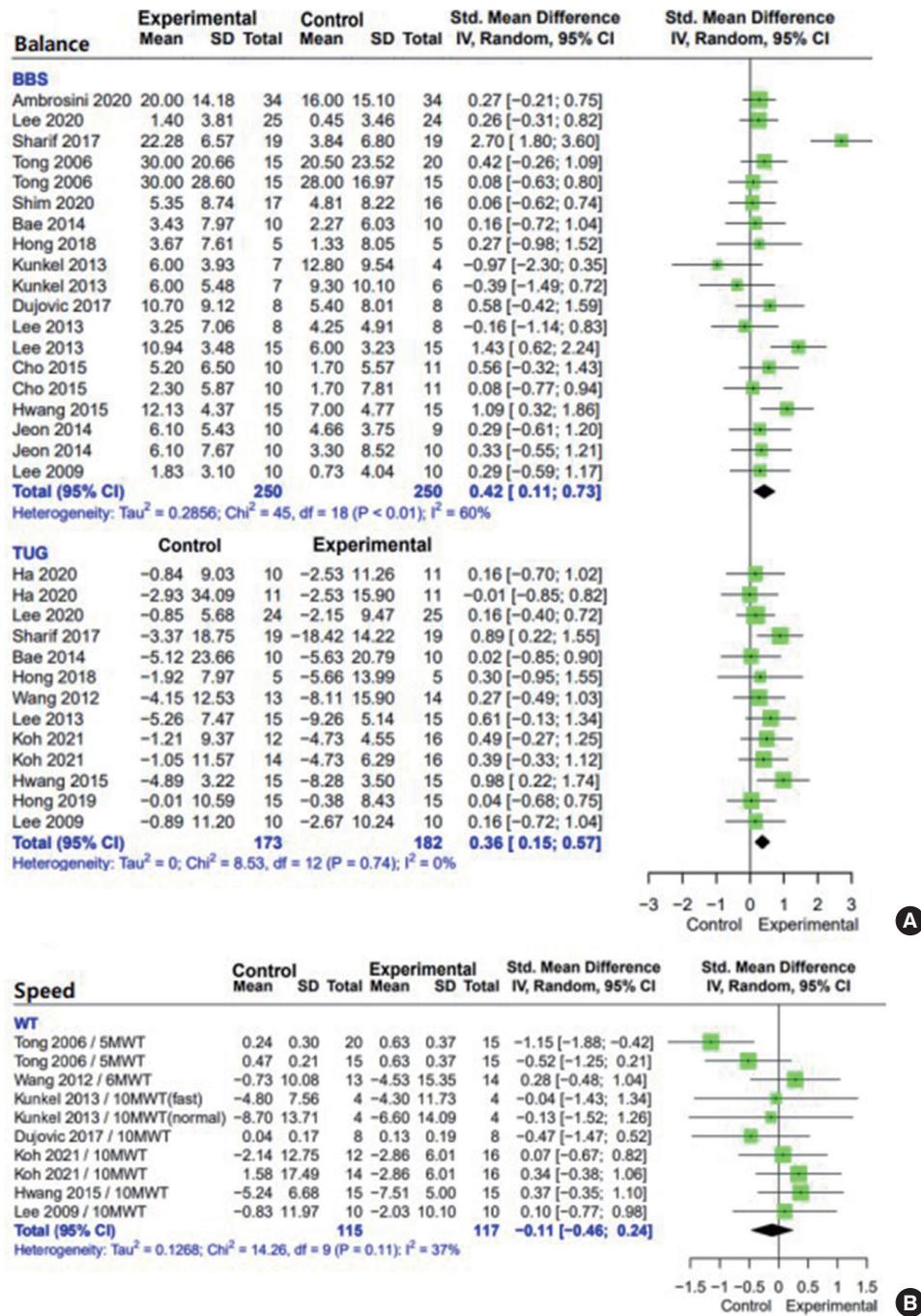


Figure 2. Effect of FES on balance and gait speed. BBS: berg balance scale, TUG: timed up and go Test, WT: walking test.

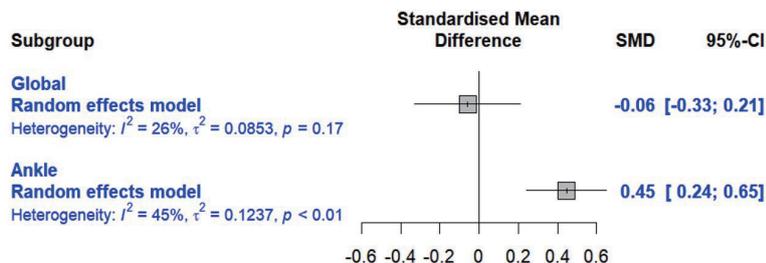


Figure 3. Subgroup analysis - FES effects depending on electrical stimulation site

다른 부위를 함께 자극하는 것보다 발목을 위주로 FES를 적용했을 경우 효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 FES는 뇌졸중 환자의 균형을 유의하게 개선시키는 것으로 나타났다. FES는 중추신경계 손상으로 마비된 환자의 신체에 움직임을 생성하는 장치이고³⁶, 자발적으로 조절되지 않는 근육을 자극하여 근력을 증가시키고 기능적 움직임을 개선할 수 있다.³⁷ 전기생리학적 변화의 유도와 운동조절 능력의 개선은 뇌졸중 환자의 마비측 조절능력을 향상시킬 수 있다.^{38,39} 사이클 운동에 FES를 결합한 메타분석 연구에서는 사이클 운동이 뇌졸중 환자의 보행속도, 능력과 균형에 긍정적인 영향을 미쳤으며, FES를 결합한 사이클링을 했을 때 균형에서 더욱 더 큰 영향을 미쳤다.⁴⁰ 또한 체중지지 트레드밀에 FES를 적용한 메타분석 연구에서 BBS에 대한 유의한 개선이 있었으며 본 연구의 결과와 일치했다.⁴¹ FES는 무릎의 조절과 발 떨어짐을 개선하는데 중요한 역할을 하며, 최근 몇 년 동안 발처짐과 박급이의 교정하는 역할을 했다.⁴² 보행 시 고유감각을 자극하고 개선하기 위해 올바른 움직임 패턴의 반복적인 제공이 환자의 운동기능 개선에 도움이 되었을 것으로 생각된다.

본 연구에서 WT는 유의한 개선이 나타나지 않았다. 이러한 결과는 Jaqueline da Cunha 등³의 연구와 같은 결과가 나타났다. 보행에는 여러 근육들의 동시적인 활동이 필요하기 때문에 전기 자극 중재가 보행 속도의 변화에 영향을 미치지 않았을 수 있다.⁴³ Galvão 등⁴⁴은 FES를 이용한 자전거 타기는 보행 속도를 개선시킨다고 보고했다. 보행속도의 회복은 근육의 기능 개선과 말초적인 기전 그리고 대뇌 피질에서 기능 개선인 중추적 기전의 작용이 협동으로 필요하다.⁷ 이처럼 보행 속도의 개선을 위해서는 FES와 근력 훈련을 같이 포함해 적용해야 할 것으로 생각된다.

다른 부위와 함께 FES를 적용했을 경우에는 유의한 개선이 나타나지 않았지만, 부착부위가 발목에 적용했을 경우에는 유의한 개선이 나타났다. 뇌졸중 환자의 보행 시 지지단계에서는 넙다리내갈래근을 자극해 체중지지를 촉진하고, 앞정강근의 수축을 자극해 상호 억제 효과를 생성하며, 발가락 굽힘근의 경련을 억제하고, 박급이와 발 떨어짐을 개선해야 한다. 스윙 단계에서는 앞정강근을 자극해 등쪽 굽힘을 유도하여 보행 시 소모되는 에너지를 줄일 수 있다. FES를 통한 등쪽 굽힘의 촉진은 발목 안정성을 개선할 수 있고 뇌졸중환자의 보행 회복에서 매우 중요하다. 발목 가동성의 개선은 보행 중 전방으로의 체중지지, 안정성과 보행속도를 개선할 수 있다.⁴⁵ 그리고 발목 가동성 및 걷잡지킴근 활동의 개선은 앉기, 회전 및 이동 동작에서 서 있는 상태를 유지하는 데 필요한 발목 전략을 촉진시키며³, 반복적인 근육 수축을 통해 FES는 뇌에 대한 감각 입력을 증가시킴으로써 운동 재학습에 기여할 수 있었을 것이다.⁴⁶ 또한, 본 연구에 포함된 FES의 다른 부착부위로는 배, 넙다리, 엉덩관절 등에 부착되었으며 발목

관절을 제외하고는 부착 범위가 굉장히 다양했다. 향후, FES를 다양하게 부착한 추가적인 연구들이 필요할 것이다.

본 연구의 제한점으로는 FES와 함께 적용한 중재에 제한을 두지 않고 모두 수집했기 때문에 선정된 문헌의 전기자극 중재 프로토콜의 불일치로 인한 전기자극의 치료적 이점을 희석시켰을 수 있다. 따라서, 향후 연구에서는 동질적인 중재와 다양한 부착부위에 FES를 적용한 연구의 분석이 진행되어야 할 것으로 생각된다. 또한, 전기자극치료는 전류, 빈도, 자극지속시간, 선정된 문헌 간 대상자들의 실험 전 기능수준 등을 고려해야 한다.⁴⁷ 본 연구에서 선정된 19개 문헌에서 전기자극의 중재 방법이 다양했기 때문에 동일한 자극 프로토콜을 사용하였다고 볼 수 없다고 생각된다.

결론적으로 뇌졸중 환자에게 FES를 결합한 치료적 중재가 시행되었을 때 균형에서 긍정적인 효과가 나타났지만 보행속도에서는 유의한 개선이 나타나지 않았다. 부착부위에 따른 효과에서는 발목을 포함해 다른 부위에 함께 적용하는 것보다 발목 위주로 FES를 부착하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 향후 연구에서 더 나은 결과를 얻기 위해 FES와 근력 훈련을 함께 적용한 중재를 강조할 수 있으며 FES가 활동수준에서 미치는 영향을 확인하기 위해 부착 부위에 다양성을 두는 방법론적 품질이 높은 연구가 추가적으로 진행되어야 한다.

REFERENCES

1. Doria JW, Forgacs PB. Incidence, implications, and management of seizures following ischemic and hemorrhagic stroke. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2019;19(7):37.
2. Nolan KJ, Yarossi M. Weight transfer analysis in adults with hemiplegia using ankle foot orthosis. *Prosthet Orthot Int.* 2011;35(1):45-53.
3. Jaqueline da Cunha M, Rech KD, Salazar AP et al. Functional electrical stimulation of the peroneal nerve improves post-stroke gait speed when combined with physiotherapy. A systematic review and meta-analysis. *Ann Phys Rehabil Med.* 2021;64(1):101388.
4. Tyson SF, Crow JL, Connell L et al. Sensory impairments of the lower limb after stroke: a pooled analysis of individual patient data. *Top Stroke Rehabil.* 2013;20(5):441-9.
5. Prenton S, Hollands KL, Kenney LPJ et al. Functional electrical stimulation and ankle foot orthoses provide equivalent therapeutic effects on foot drop: a meta-analysis providing direction for future research. *J Rehabil Med.* 2018;50(2):129-39.
6. Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomed Eng Online.* 2020;19(1):34.
7. Eraifej J, Clark W, France B et al. Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis. *Syst Rev.* 2017;6(1):40.
8. Kang KY, Kim TY. Effects of a combined functional electrical stimulation with action observation training for balance and gait performance in stroke patients. *J Korean Soc Phys Med.* 2016;11(2):93-102.

9. Howlett OA, Lannin NA, Ada L et al. Functional electrical stimulation improves activity after stroke: a systematic review with meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2015;96(5):934-43.
10. Mahmoudi Z, Mohammadi R, Sadeghi T et al. The effects of electrical stimulation of lower extremity muscles on balance in Stroke patients: a systematic review of literatures. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2021;30(8):105793.
11. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021; 372:n71.
12. Downs S, Marquez J, Chiarelli P. The Berg Balance Scale has high intra- and inter-rater reliability but absolute reliability varies across the scale: a systematic review. *J Physiother.* 2013;59(2):93-9.
13. Ortega-Bastidas P, Gómez B, Aqueveque P et al. Instrumented Timed Up and Go Test (iTUG)-more than assessing time to predict falls: a systematic review. *Sensors (Basel).* 2023;23(7):3426.
14. Cleland BT, Perez-Ortiz A, Adhavan S. Walking test procedures influence speed measurements in individuals with chronic stroke. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2020;80:105197.
15. Maher CG, Sherrington C, Herbert RD et al. Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials. *Phys Ther.* 2003; 83(8):713-21.
16. Cashin AG, McAuley JH. Clinimetrics: physiotherapy evidence database (PEDro) scale. *J Physiother.* 2020;66(1):59.
17. Ambrosini E, Peri E, Nava C et al. A multimodal training with visual biofeedback in subacute stroke survivors: a randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2020;56(1):24-33.
18. Ha SY, Han JH, Ko YJ et al. Ankle exercise with functional electrical stimulation affects spasticity and balance in stroke patients. *J Exerc Rehabil.* 2020;16(6):496-502.
19. Lee K. Balance training with electromyogram-triggered functional electrical stimulation in the rehabilitation of stroke patients. *Brain Sci.* 2020; 10(2):80.
20. Sharif F, Ghulam S, Alik AN et al. Effectiveness of functional electrical stimulation (FES) versus conventional electrical stimulation in gait rehabilitation of patients with stroke. *J Coll Physicians Surg Pak.* 2017;27(11): 703-6.
21. Tong RK, Ng MF, Li LS. Effectiveness of gait training using an electromechanical gait trainer, with and without functional electric stimulation, in subacute stroke: a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil.* 2006;87(10):1298-304.
22. Shim J, Hwang S, Ki K et al. Effects of EMG-triggered FES during trunk pattern in PNF on balance and gait performance in persons with stroke. *Restor Neurol Neurosci.* 2020;38(2):141-50.
23. Bae YH, Ko YJ, Chang WH et al. Effects of robot-assisted gait training combined with functional electrical stimulation on recovery of locomotor mobility in chronic stroke patients: a randomized controlled trial. *J Phys Ther Sci.* 2014;26(12):1949-53.
24. Hong J, Lee H. The effect of task oriented exercise and abdominal muscle contraction using FES on abdominal muscle thickness and balance of stroke patients. *Arch Orthop Sports Phys Ther.* 2018;14(2):117-26.
25. Wang GS, Yoon SW, Cho WS et al. Effect of the combined use of FES and over ground walking with partial bodyweight support on walking and balance competency in patients with chronic strokes. *J Kor Acad Clin Elec.* 2012;10(1):15-22.
26. Kunkel D, Pickering RM, Burnett M et al. Functional electrical stimulation with exercises for standing balance and weight transfer in acute stroke patients: a feasibility randomized controlled trial. *Neuromodulation.* 2013;16(2):168-77.
27. Dujović SD, Alešević J, Alešević N et al. Novel multi-pad functional electrical stimulation in stroke patients: a single-blind randomized study. *NeuroRehabilitation.* 2017;41(4):791-800.
28. Lee SY, Kang SY, Im SH et al. The effects of assisted ergometer training with a functional electrical stimulation on exercise capacity and functional ability in subacute stroke patients. *Ann Rehabil Med.* 2013;37(5): 619-27.
29. Lee HJ, Cho KH, Lee WH. The effects of body weight support treadmill training with power-assisted functional electrical stimulation on functional movement and gait in stroke patients. *Am J Phys Med Rehabil.* 2013;92(12):1051-9.
30. Koh S, Choi W, Lee S. The effects of stair climbing training with functional electrical stimulation on muscle strength, balance, and gait in patients with chronic stroke. *Phys Ther Rehabil Sci.* 2021;10(1):32-9.
31. Cho MK, Kim JH, Chung Y et al. Treadmill gait training combined with functional electrical stimulation on hip abductor and ankle dorsiflexor muscles for chronic hemiparesis. *Gait Posture.* 2015;42(1):73-8.
32. Hwang DY, Lee HJ, Lee GC et al. Treadmill training with tilt sensor functional electrical stimulation for improving balance, gait, and muscle architecture of tibialis anterior of survivors with chronic stroke: a randomized controlled trial. *Technol Health Care.* 2015;23(4):443-52.
33. Jeon GY, Choi WJ, Lee SW. The effect of a combined functional electrical stimulation with progressive speed treadmill training for gait and balance performance in stroke survivors. *J Spec Edu Rehabil Sci.* 2014;53 (3):365-83.
34. Hong J, Lee H. The effects of FES on balance and gait ability in patients of stroke patients. *J Korean Soc Integrative Med.* 2019;7(2):95-109.
35. Lee SH, Lee SW, Shin WS et al. The effects of gait training with functional electrical stimulation on recovery of function in hemiplegia. *Journal of Sport and Leisure Studies.* 2009;38(2):981-91.
36. Nagai MK, Marquez-Chin C, Popovic MR. Why is functional electrical stimulation therapy capable of restoring motor function following severe injury to the central nervous system? *Medicine.* 2016;479-98.
37. Glanz M, Klawansky S, Stason W et al. Functional electrostimulation in poststroke rehabilitation: a meta-analysis of the randomized controlled trials. *Arch Phys Med Rehabil.* 1996;77(6):549-53.
38. Combs S, Miller EW, Forsyth E. Motor and functional outcomes of a patient post-stroke following combined activity and impairment level training. *Physiother Theory Pract.* 2007;23(4):219-29.
39. Shariat A, Najafabadi MG, Ansari NN et al. The effects of cycling with and without functional electrical stimulation on lower limb dysfunction in patients post-stroke: a systematic review with meta-analysis. *Neuro-Rehabilitation.* 2019;44(3):389-412.
40. Aaron SE, Vanderwerker CJ, Embry AE et al. FES-assisted cycling improves aerobic capacity and locomotor function postcerebrovascular accident. *Med Sci Sports Exerc.* 2018;50(3):400-6.
41. Wang J, Zhao L, Gao Y et al. The difference between the effectiveness of body-weight-supported treadmill training combined with functional electrical stimulation and sole body-weight-supported treadmill training for improving gait parameters in stroke patients: a systematic review and meta-analysis. *Front Neurol.* 2022;13:1003723.

42. Yan T, Hui-Chan CW, Li LS. Functional electrical stimulation improves motor recovery of the lower extremity and walking ability of subjects with first acute stroke: a randomized placebo-controlled trial. *Stroke*. 2005;36(1):80-5.
43. Everaert DG, Thompson AK, Chong SL et al. Does functional electrical stimulation for foot drop strengthen corticospinal connections? *Neuro-rehabil Neural Repair*. 2010;24(2):168-77.
44. Galvão WR, Castro Silva LK, Formiga MF et al. Cycling using functional electrical stimulation therapy to improve motor function and activity in post-stroke individuals in early subacute phase: a systematic review with meta-analysis. *Biomed Eng Online*. 2024;23(1):1.
45. Yang YR, Mi PL, Huang SF et al. Effects of neuromuscular electrical stimulation on gait performance in chronic stroke with inadequate ankle control - A randomized controlled trial. *PLoS One*. 2018;13(12):e0208609.
46. Yang CY, Kim TJ, Lee JH et al. The effect of functional electrical stimulation on the motor function of lower limb in hemiplegic patients. *Ann Rehabil Med*. 2009;33(1):29-35.
47. Ring H, Treger I, Gruendlinger L et al. Neuroprosthesis for footdrop compared with an ankle-foot orthosis: effects on postural control during walking. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2009;18(1):41-7.