

## 만성 편마비 환자의 비마비측 발바닥굽힘근 근피로가 시·공간적 보행변수에 미치는 영향

이재웅 · 구현모<sup>†</sup>

큰솔병원 물리치료실, <sup>1</sup>경성대학교 물리치료학과

### The Effects of Fatigue in the Non-Paretic Plantarflexor Muscle on Spatial and Temporal Gait Parameters during Walking in Patients with Chronic Stroke

Jae-Woong Lee · Hyun-Mo Koo<sup>†</sup>

*Department of Physical Therapy, Keunsol Hospital*

*<sup>1</sup>Department of Physical Therapy, College of Science, Kyungsung University*

Received: July 16, 2018 / Revised: July 26, 2018 / Accepted: July 31, 2018

© 2018 Journal of Korea Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### | Abstract |

**Purpose:** The purpose of this study was to obtain detailed and quantified data concerning the effects of plantarflexor muscle fatigue induced in the non-paretic side on the spatial and temporal gait parameters of the bilateral lower extremities during walking in stroke patients.

**Methods:** This study was conducted on 20 patients with chronic stroke. The load contraction fatigue test was applied to induce muscle fatigue in the non-paretic plantarflexor muscle. Step length, stride length, double support, gait velocity and cadence, and functional ambulatory profile (FAP) score in the bilateral lower extremities were measured using a gait analysis system in order to investigate changes in temporal and spatial gait parameters caused by muscle fatigue on the non-paretic side. The statistical significance of the results was evaluated using a paired t-test.

**Results:** A review of the results for gait parameters revealed a significant increase in double support ( $p < 0.05$ ) and a significant decrease in step length, stride length, gait velocity and cadence, and FAP score ( $p < 0.05$ ).

**Conclusion:** These results indicate that the muscle fatigue in the non-paretic side of the stroke patients also affected the paretic side, which led to a decrease in gait functions. This implies a necessity to perform exercise or training programs in a range of clinical aspects not causing muscle fatigue.

**Key words:** Chronic stroke, Gait parameters, Muscle fatigue

<sup>†</sup>Corresponding Author : Hyun-Mo Koo (hmkoo@ks.ac.kr)

## I. 서론

뇌졸중 환자의 50% 이상이 보행 장애를 갖게 되고 (Duncan et al., 2005), 이는 병변과 관련된 신경학적인 손상, 이차적으로 나타나는 마비측의 비사용 등에 의해 발생하는 근력약화, 감각소실, 마비, 연부조직의 구축, 비정상적인 근긴장과 움직임 패턴 등에 의해 나타나게 된다(Kelly et al., 2003; Kim & Eng, 2003). 뇌졸중 환자에서 전형적으로 나타나는 지속적인 마비측 비사용은 운동겉질(motor cortex)의 위축을 가속화시키고, 이로 인해 보행과 같은 운동활동에서 개별 관절의 선택적인 조절이 아닌 공동운동패턴의 경향이 강화되어(Bensoussan et al., 2006; Gracies, 2005), 경직성 마비에 의한 다양한 신체 기능의 제한이 발생하게 된다. 이와 함께, 근력약화는 뇌졸중 환자의 기능적 재활을 제한하는 요소로서 보행능력을 예측할 수 있는 기초 항목이며 보행능력과의 높은 관련성을 가진 임상적 문제이다(Nyberg & Gustafson, 1995).

뇌졸중에 의한 편마비 환자에서 흔히 나타나는 손상 중 하나인 마비측의 근력약화는 지속적인 마비측의 비사용에 의한 모세혈관 감소, 혈류의 제한 및 산소 대사 능력의 감소와 관련된 결과이며, 비마비측 보다 마비측 근육에서 근피로가 호발되고 회복 속도도 지연된다(Horstman et al., 2010). 이는 비마비측의 과사용 경향을 초래하고, 비마비측의 과활동에 의한 영향이 반대측 사지에도 영향을 미치게 된다(Carroll et al., 2006). 이와 같은 특성으로 인해 마비측과 비마비측의 근력 불균형이 초래되고 비대칭적인 자세와 체중부하의 불균형이 나타나게 된다(Bohannon, 1991). 뇌졸중 환자는 선 자세에서 마비측 하지에 체중의 25-43%의 부하만을 지지함으로써 비대칭적인 자세를 취하게 되므로(Yang et al., 2007), 무게중심 이동능력이 저하되고 보행능력이 현저히 감소된다(Geiger et al., 2001). 마비측의 감소된 체중지지 능력은 보행 시 비마비측 하지의 발바닥굽힘근 활동을 증가시키고(Sommerfeld et al., 2004), 이로 인한 장시간의 과도한 근육활동으로 근피로가 유발된다(Edwards, 1983). 특히, 발바닥굽힘

근과 같은 발목관절 근육의 근피로는 발목관절 주변의 근육 불균형을 초래하여 발과 발목의 안정성을 약화시킴으로써(Gefen et al., 2002), 보행기능과 같은 운동 능력에 부정적 영향을 미치게 된다.

보행 기능에 영향을 미치는 다양한 요인 중 하나인 근피로는 뇌졸중 환자에서 일반적으로 나타나는 임상적 문제로서(McKevitt et al., 2011), 적절한 힘을 발휘하는 능력의 상실뿐만 아니라 근력의 발생 순서, 힘의 생성과 유지에 문제를 초래하여 신체 지지나 이동에도 영향을 미치며(Di Fabio, 1997), 이로 인해 보행 시 하지의 운동학적 요소가 변화될 수 있다(Rybar et al., 2014). 이와 같이 근피로는 일상생활 또는 운동을 수행하는 데 있어 이차적인 손상을 일으키는 잠재적인 요인이 되는데(Wojcik et al., 2011), 특히 근피로에 의한 하지 근력의 감소는 균형능력을 저하시켜 낙상을 일으키는 중요한 원인이 되고, 뇌졸중 환자의 보행을 더욱 불안정하게 만드는 요인으로 받아들여지고 있다(Gimmon et al., 2011; Stolze et al., 2004; Yaggie & McGregor, 2002).

따라서, 본 연구에서는 뇌졸중 환자를 대상으로 과도한 비마비측 하지의 사용에 따른 발바닥굽힘근 근피로가 보행 시 지면상의 시-공간적 보행변수에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보려고 하였다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 대상자

본 연구는 부산 소재 K 병원에 입원하여 물리치료를 받고 있는 환자 중 뇌졸중 진단을 받고 6개월 이상 경과한 편마비 환자 20명을 대상으로 실험을 진행하였다. 본 연구의 대상자 수 산출을 위해서 표본수 산출 프로그램(G-power 3.1, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Germany)을 이용하였고, 선행연구(Rybar et al., 2014)를 근거로 효과 크기(effect size) 0.88, 유의 수준 0.05, 검정력 80%, 탈락율 10%로 설정하여 대상자 수를 결

정하였다.

연구 대상자가 실험 내용을 이해할 수 있도록 본 연구의 목적과 방법에 대해 충분히 숙지시킨 후 동의 를 얻었으며, 1) 독립적으로 10m 이상 보행이 가능한 자, 2) 골반 및 양하지에 정형외과적 질환이 없는 자, 3) 마비측 하지의 경직이 MAS (modified ashworth scale) G2 이하인 자, 4) 비마비측 하지의 근력이 도수 근력검사서에서 F 이상으로 측정된 자, 5) 연구자가 지시 하는 내용을 이해하고 따를 수 있으며, 한국판 간이정 신상태검사(MMSE-K)에서 24점 이상 획득한 자를 연 구대상자의 구체적인 선정 조건으로 설정하였다. 그 리고, 본 연구는 사전에 경성대학교 생명윤리위원회 (Kyungsung University Institutional Review Board)의 승 인(KSU-15-06-001)을 받은 후 진행하였다.

## 2. 근피로 유발

Gefen 등(2002)이 사용한 부하수축 피로검사(forced contraction fatigue test) 방법을 사용하였고, 연구 대 상자가 상지로 신체를 지지하여 선 자세에서 비마비측 하지의 선택적 발바닥굽힘을 유도하여 발바닥굽힘근 의 근피로를 유발하였다. 마비측 발은 20cm 높이의 발판 위에 위치를 고정하여 마비측 하지의 사용을 제 한한 상태에서 비마비측에서만 능동적인 발바닥굽힘 을 유도하였다(Fig. 1). 중립위치에서 최대 발바닥굽힘 위치까지 움직인 후 1초 동안 유지하고, 다시 중립위치 로 되돌아오는 동작을 반복하여 수행하도록 통제하였 고, Cheng과 Rice (2012)의 연구에서 사용한 근피로 유발기준을 수정하여 적용하여, 근피로에 의해 발바 닥굽힘 동작의 관절가동범위가 전체 가동범위의 50% 이하로 감소되는 시점까지 최대한 반복 수행하도록 통제하였다.

## 3. 보행변수 측정

보행 시 지면상의 시·공간적 보행변수를 측정하기 위하여 보행분석 시스템(GAITRite, CIR Systems Inc.,



Fig. 1. Method of fatigue induction.



Fig. 2. Gait analysis system (GAITRite, CIR Systems Inc., USA).

USA)을 이용하여 걸음 길이(step length), 온걸음 길이 (stride length), 양하지 지지기(double support), 보행속 도(gait velocity), 분당 걸음수(cadence), 기능적 보행지 수(functional ambulatory profile, FAP)를 측정하였다 (Fig. 2). 보행분석 시스템은 보행의 시·공간적 변수를 분석하는데 신뢰도와 타당성이 검증된 장비로서 총 길이가 460cm, 폭 90cm, 높이 0.6cm의 전자식 보행판에 직경 1cm인 13,824개의 압력 감지 센서가 길이 366cm, 폭 61cm의 범위 내에 1.27cm마다 수직으로 배열되어 정보를 수집한다. 보행변수를 측정하기 전에 기능적 보행지수 산출에 필요한 사실상 다리길이(true leg length)를 측정하기 위하여 대상자가 누운 자세에서 위앞엉덩뼈가시와 안쪽복사(medial malleolus)까지의 길이를 측정하여 보행분석 시스템의 프로그램에 입력 하였다. 보행변수의 측정은 연구자의 구두지시에 따 라 대상자가 보행 판의 2m 전부터 편안한 보행을 유지

하여 보행 판 위를 걸어 통과하도록 하였고, 각 3회 반복 측정을 실시하여 평균값을 구하였다. 수집된 정보는 GAITRite GOLD Version 4.5b 소프트웨어(CIR Systems Inc., USA)로 분석하였다.

#### 4. 자료 분석

SPSS 21.0 Version(IBM SPSS Inc., USA)을 이용하여 통계학적 분석을 실시하였고, 비마비측 하지의 발바닥굽힘근에서 근피로를 유발하기 전 및 근피로 유발 후의 보행 시 지면상의 시·공간적 보행변수를 분석하기 위해서 대응표본 t-검정을 이용하였다. 통계학적인 유의 수준  $\alpha$ 는 0.05로 설정하였다.

### III. 연구 결과

#### 1. 연구 대상자의 일반적 특성

부산광역시 소재 OO병원에 입원 중인 20명의 뇌졸중 환자가 본 연구에 동의 후 참여하였고, 성별비율은 남성 12명, 여성 8명으로 구성되었으며, 평균 연령  $55.45 \pm 11.51$ 세, 평균 신장  $167.75 \pm 6.70$ cm, 평균 체중  $67.03 \pm 12.50$ kg이었다. 연구 대상자 20명 중 허혈성 뇌손상 12명, 출혈성 뇌손상 8명이었으며, 왼쪽 편마비 및 오른쪽 편마비가 각각 10명씩으로 나타났다.

#### 2. 보행 시 지면상의 시·공간적 보행변수

##### 1) 걸음 길이

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 마비측 걸음 길이는 근피로 유발 전  $47.06 \pm 7.64$ cm에서 근피로 유발 후  $44.85 \pm 8.15$ cm로 통계학적으로 유의한 감소를 보였으며( $p < 0.05$ ), 비마비측 걸음 길이는 근피로 유발 전  $46.35 \pm 7.25$ cm에서 근피로 유발 후  $44.23 \pm 7.38$ cm로 통계학적으로 유의한 감소를 나타내었다

Table 1. The comparison of step length at pre-test and post-test (unit: cm)

Side	Pre/Post	Mean±SD	p
Paretic	Pre	47.06±7.64	0.01*
	Post	44.85±8.15	
Non-paretic	Pre	46.35±7.25	0.02*
	Post	44.23±7.38	

\* $p < 0.05$

( $p < 0.05$ )(Table 1).

##### 2) 온걸음 길이

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 마비측 온걸음 길이는 근피로 유발 전  $94.97 \pm 14.26$ cm에서 근피로 유발 후  $89.44 \pm 18.07$ cm로 통계학적으로 유의한 감소를 보였으며( $p < 0.05$ ), 비마비측 온걸음 길이는 근피로 유발 전  $95.39 \pm 14.49$ cm에서 근피로 유발 후  $91.75 \pm 14.67$ cm로 통계학적으로 유의한 감소를 나타내었다( $p < 0.05$ )(Table 2).

Table 2. The comparison of stride length at pre-test and post-test (unit: cm)

Side	Pre/Post	Mean±SD	p
Paretic	Pre	94.97±14.26	0.03*
	Post	89.44±18.07	
Non-paretic	Pre	95.39±14.49	0.02*
	Post	91.75±14.67	

\* $p < 0.05$

##### 3) 양하지 지지기

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 마비측 양하지 지지기는 근피로 유발 전 전체 보행주기(gait cycle, GC) 중  $30.44 \pm 5.41\%$ 에서 근피로 유발 후  $32.81 \pm 4.91\%$ 로 통계학적으로 유의한 증가를 보였으며( $p < 0.05$ ), 비마비측 양하지 지지기는 근피로 유발 전  $32.03 \pm 5.83\%$ 에서 근피로 유발 후  $34.80 \pm 4.53\%$ 로

통계학적으로 유의한 증가를 나타내었다( $p<0.05$ ) (Table 3).

Table 3. The comparison of double support at pre-test and post-test (unit: %GC)

Side	Pre/Post	Mean±SD	p
Paretic	Pre	30.44±5.41	0.01*
	Post	32.81±4.91	
Non-paretic	Pre	32.03±5.83	0.01*
	Post	34.80±4.53	

\* $p<0.05$

#### 4) 보행속도

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 보행속도는 근피로 유발 전  $75.87\pm 18.69\text{cm/sec}$ 에서 근피로 유발 후  $70.11\pm 16.56\text{cm/sec}$ 로 통계학적으로 유의한 감소를 나타내었다( $p<0.05$ )(Table 4).

Table 4. The comparison of gait velocity at pre-test and post-test(unit: cm/sec)

Pre/Post	Mean±SD	p
Pre	75.87±18.69	0.02*
Post	70.11±16.56	

\* $p<0.05$

#### 5) 분당 걸음수

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 분당 걸음수는 근피로 유발 전  $84.96\pm 12.73\text{steps/min}$ 에서 근피로 유발 후  $79.11\pm 11.76\text{steps/min}$ 로 통계학적으로 유의한 감소를 나타내었다( $p<0.05$ )(Table 5).

Table 5. The comparison of cadence at pre-test and post-test (unit: steps/min)

Pre/Post	Mean±SD	p
Pre	84.96±12.73	0.01*
Post	79.11±11.76	

\* $p<0.05$

#### 6) 기능적 보행지수

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 기능적 보행지수는 근피로 유발 전  $77.40\pm 8.24$ 점에서 근피로 유발 후  $72.55\pm 9.27$ 점으로 통계학적으로 유의한 감소를 나타내었다( $p<0.05$ )(Table 6).

Table 6. The comparison of FAP at pre-test and post-test

Pre/Post	Mean±SD	p
Pre	77.40±8.24	0.00*
Post	72.55±9.27	

\* $p<0.05$

### IV. 고 찰

본 연구에서는 만성 뇌졸중으로 인한 편마비 환자를 대상으로 비마비측 발바닥굽힘근에 대하여 근피로를 유발시킨 후, 보행 시에 지면상의 시·공간적 보행변수 및 보행 기능에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 알아보고자 하였고, 이를 위해 뇌졸중 환자를 대상으로 한 연구에서 신뢰도가 입증된 평가 도구인(Kuys et al., 2011), 보행분석 시스템을 이용하여 걸음 길이, 온걸음 길이, 양하지 지지기, 보행속도, 분당 걸음수, 기능적 보행지수를 측정하였다.

뇌졸중 환자는 보행주기의 디딤기 시에 발뒤꿈치가 지면에 닿지 않고 발바닥이나 발끝으로 닿게 되어 디딤기가 짧아지고 발끝밀기에 어려움을 겪게 된다. 흔들기에는 무릎관절 굽힘의 부족으로 인해 발이 지면에 닿게 되어 보상작용으로 휘둘림 보행과 같은 비효율적인 보행 패턴이 나타나게 된다(Umphred et al., 2013). 이러한 뇌졸중 환자의 비정상적인 움직임 패턴은 대체적으로 정상인에 비해 현저하게 느린 보행속도, 분당 걸음수 감소, 보행주기 증가, 양하지 지지기 증가, 온걸음 길이 감소, 마비측 디딤기 감소와 흔들기의 증가 등 보행 시 시·공간적 변수들의 뚜렷한 차이를 나타내는 결과를 초래하게 된다(Hsu et al., 2003; Kosak

& Reding, 2000; Yan et al., 2005).

본 연구에서도 비마비측 하지의 발바닥굽힘근 근피로가 보행 시 비마비측 뿐만 아니라 마비측 하지에 서도 걸음 길이, 온걸음 길이가 통계학적으로 유의하게 감소하였고, 양하지 지지기는 통계학적으로 유의하게 증가하였으며, 보행속도, 분당 걸음수, 기능적 보행지수가 통계학적으로 유의하게 감소하였다. 걸음 길이와 온걸음 길이의 유의한 감소는 넙다리곧은근 등의 근수축력이 약화되어 발가락 떼기 시간과 초기 흔들기 기간 동안 엉덩관절 굽힘이 감소되고 (Annaswamy et al., 1999; Nene et al., 1999), 이로 인해 하지의 충분한 전방 진행이 이루어지지 않았기 때문이라 사료된다. 20명의 남자 성인을 대상으로 근피로가 보행과 장애물 넘기에 미치는 영향을 확인한 Barbieri 등(2013)의 연구에서도 걸음 길이와 온걸음 길이가 감소하여 본 연구 결과와 일치하였고, 이는 동적 안정성 확보를 위한 보상적 작용의 결과라고 하였다.

본 연구에서는 근피로 유발 후 통계학적으로 유의하게 감소한 보행속도를 확인할 수 있었다. 이는 발바닥굽힘근이 발끝 떼기 시간에 넙다리곧은근과 더불어 신체가 전방으로 나가는데 가장 많은 추진력을 제공함으로써 보행속도에 영향을 미치는데(Eng & Winter, 1995; Winter & Sienko, 1988), 근피로로 인해 근수축력이 감소하여 나타난 결과로 생각된다. 이와 함께, 뇌졸중 발병 후 운동기능 장애와 동반되는 감각운동 정보의 손상도 관절의 안정성 저하와 운동학적 비대칭을 유발함으로써(Docherty et al., 2004) 본 연구의 결과와 같은 보행 속도 감소의 원인으로 작용하였을 것으로 판단된다.

뇌졸중 환자의 보행 능력과 관련된 여러 보행 요소들 중에서도 전체적인 보행능력을 평가할 수 있고 신뢰도가 가장 높은 보행속도는 임상적 추이와 전체적 기능 상태에서 비정상적 정도를 나타내는 유용한 지표가 되며(Frigo et al., 2003), 보행속도의 감소는 운동능력의 제한으로 이어지게 된다(Chen et al., 2005; Wall & Turnbull, 1986). 또한, 보행속도는 분당 걸음수의

수치와 비례 관계를 가지며(Jonsdottir et al., 2009), 양하지 지지기와 반비례 관계를 가진다(Stansfield et al., 2006). 본 연구의 결과에서 확인된 보행 시 양하지 지지기의 증가는 균형능력의 저하로 인해 나타나는 무게 중심의 편위에 대한 낙상 예방을 위한 보상전략으로 나타나게 된다(Callisaya et al., 2010). 결과적으로 하지의 근육들이 보행 시에 근피로로 인해 충분한 추진력을 제공하지 못하여 보행속도와 분당 걸음수는 감소하고 양하지 지지기는 증가된 것으로 생각된다. 보행 시 특정 근육의 근피로가 정상인에서는 보상작용을 통해서 보행속도와 같은 보행 기능에 유의한 영향을 미치지 않지만, 뇌졸중 환자에서는 근피로의 영향으로 인한 보행속도의 유의한 감소가 나타나므로(Rybar et al., 2014), 뇌졸중 환자에 대한 중재를 적용하는 과정에서 근피로에 대한 고려가 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다. Kalron (2015)이 다발성 경화증 환자와 정상 성인을 대상으로 실시한 횡단면적 연구(cross-sectional study)에서도 근피로의 영향으로 인한 보행속도의 감소가 확인되어 본 연구의 결과를 뒷받침한다.

보행 기능의 종합적 평가를 위해 흔히 사용되는 기능적 보행지수는 대상자의 신체적 측정값과 보행분석 시스템에 의해 얻어진 시·공간적 보행요소의 측정값을 통해 산출되고, 보행을 연속적으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다(Nelson, 1974). Titianova 등(2004)은 기능적 보행지수는 뇌졸중 환자의 시간적 보행요소와 상관관계를 가진다고 보고하였으며 뇌졸중 환자의 보행장애를 평가하는 유용한 지표로서 기능적 장애의 정도를 나타낸다고 하였다. 본 연구의 연구대상자로부터 측정된 기능적 보행지수는 건강한 성인의 기능적 보행지수 범위인 95~100점에 현저히 미달할 뿐만 아니라, 근피로 유발 전 77.40±8.24점에서 근피로 유발 후에는 72.55±9.27점으로 유의하게 감소되어 비마비측의 발바닥굽힘근 근피로가 종합적인 보행 기능을 현저히 감소시킴을 알 수 있었다.

연구 결과를 통해서 뇌졸중으로 인한 편마비 환자의 비마비측 발바닥굽힘근 근피로가 양하지의 근수축

력 저하를 초래하여 보행 시 양하지의 보행변수를 변화시켜 보행기능에 부정적 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 독립 보행이 가능하고 마비측 하지의 경직 수준이 MAS 등급 G2 이하로 대상자 선정 조건을 제한하였기 때문에 연구 결과를 모든 뇌졸중 환자에게 일반화하기 어렵고, 대상자의 근피로에 대한 정량적 분석이 이루어지지 않은 제한점이 있다. 따라서, 후속 연구에서는 뇌졸중 환자의 범위를 확대하고, 보행변수와 관련된 근골격계통의 구조와 기능을 관련지어 구체적으로 분석할 필요성이 있다고 생각된다.

## V. 결론

만성 뇌졸중으로 인한 편마비 환자 20명을 대상으로 보행 시 지면상의 시·공간적 보행변수에 비마비측 하지의 발바닥 굽힘근 근피로가 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 하였고, 비마비측 발바닥굽힘근의 근피로가 비마비측 뿐만 아니라 마비측 하지에도 영향을 미침으로써, 보행 시의 걸음 길이, 온걸음 길이, 양하지 지지기에 변화를 초래하여 보행능력의 지표인 보행속도, 분당 걸음수, 기능적 보행지수를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 뇌졸중 환자에 대한 보행훈련 시 비마비측 과사용에 의한 근피로가 유발되지 않도록 유의하여야 함을 알 수 있다.

## Acknowledgement

본 논문은 이재웅의 석사 학위 논문의 요약본 임.

## Reference

Annaswamy TM, Giddings CJ, Della Croce U, et al. Rectus

femoris: its role in normal gait. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1999;80(8):930-934.

Barbieri FA, dos Santos PCR, Vitorio R, et al. Effect of muscle fatigue and physical activity level in motor control of the gait of young adults. *Gait & Posture*. 2013; 38(4):702-707.

Bensoussan L, Mesure S, Viton JM, et al. Kinematic and kinetic asymmetries in hemiplegic patients' gait initiation patterns. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2006; 38(5):287-294.

Bohannon RW. Measurement and treatment of paresis in the geriatric patient. *Topics in Geriatric Rehabilitation*. 1991;7(1):15-24.

Callisaya ML, Blizzard L, Schmidt MD, et al. Ageing and gait variability-a population-based study of older people. *Age and Ageing*. 2010;39(2):191-197.

Carroll TJ, Herbert RD, Munn J, et al. Contralateral effects of unilateral strength training: evidence and possible mechanisms. *Journal of Applied Physiology*. 2006; 101(5):1514-1522.

Chen G, Patten C, Kothari DH, et al. Gait differences between individuals with post-stroke hemiparesis and non-disabled controls at matched speeds. *Gait & Posture*. 2005;22(1):51-56.

Cheng AJ, Rice CL. Factors contributing to the fatigue-related reduction in active dorsiflexion joint range of motion. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2012;38(5):490-497.

Di Fabio RP. Adaptation of postural stability following stroke. *Topics in Stroke Rehabilitation*. 1997;3(4):62-75.

Docherty CL, Arnold BL, Zinder SM, et al. Relationship between two proprioceptive measures and stiffness at the ankle. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2004; 14(3):317-324.

Duncan PW, Zorowitz R, Bates B, et al. Management of adult stroke rehabilitation care: a clinical practice guideline. *Stroke*. 2005;36(9):e100-e143.

- Edwards RHT. Biochemical bases of fatigue in exercise performance: catastrophe theory of muscular fatigue. *Biochemistry of Exercise*. 1983;13:3-28.
- Eng JJ, Winter DA. Kinetic analysis of the lower limbs during walking: what information can be gained from a three-dimensional model?. *Journal of Biomechanics*. 1995;28(6):753-758.
- Frigo C, Carabalona R, Dalla Mura M, et al. The upper body segmental movements during walking by young females. *Clinical Biomechanics*. 2003;18(5):419-425.
- Gefen A, Megido-Ravid M, Itzhak Y, et al. Analysis of muscular fatigue and foot stability during high-heeled gait. *Gait & Posture*. 2002;15(1):56-63.
- Geiger RA, Allen JB, O'Keefe J, et al. Balance and mobility following stroke: effects of physical therapy interventions with and without biofeedback/forceplate training. *Physical Therapy*. 2001;81(4):995-1005.
- Gimmon Y, Riemer R, Oddsson L, et al. The effect of plantar flexor muscle fatigue on postural control. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2011;21(6):922-928.
- Gracies JM Pathophysiology of spastic paresis. I: Paresis and soft tissue changes. *Muscle & Nerve*. 2005;31(5):535-551.
- Horstman, AM, Gerits KH, Beltman MJ, et al. Intrinsic properties of the knee extensor muscle after subacute stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2010;91(1):123-128.
- Hsu AL, Tang PF, Jan MH. Analysis of impairments influencing gait velocity and asymmetry of hemiplegic patients after mild to moderate stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2003;84(8):1185-1193.
- Jonsdottir J, Recalcati M, Rabuffetti M, et al. Functional resources to increase gait speed in people with stroke: strategies adopted compared to healthy controls. *Gait & Posture*. 2009;29(3):355-359.
- Kalron A. Association between perceived fatigue and gait parameters measured by an instrumented treadmill in people with multiple sclerosis: a cross-sectional study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2015;12(1):34.
- Kelly JO, Kilbreath SL, Davis GM, et al. Cardiorespiratory fitness and walking ability in subacute stroke patients. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2003;84(12):1780-1785.
- Kim CM, & Eng JJ. The relationship of lower-extremity muscle torque to locomotor performance in people with stroke. *Physical Therapy*. 2003;83(1):49-57.
- Kosak MC, Reding MJ. Comparison of partial body weight-supported treadmill gait training versus aggressive bracing assisted walking post stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2000;14(1):13-19.
- Kuys SS, Brauer SG, Ada L. Test-retest reliability of the GAITRite system in people with stroke undergoing rehabilitation. *Disability and Rehabilitation*. 2011;33(19-20):1848-1853.
- McKevitt C, Fudge N, Redfern J, et al. Self-reported long-term needs after stroke. *Stroke*. 2011;42(5):1398-1403.
- Nelson AJ. Functional ambulation profile. *Physical Therapy*. 1974;54(10):1059-1065.
- Nene A, Mayagoitia R, Veltink P. Assessment of rectus femoris function during initial swing phase. *Gait & posture*. 1999;9(1):1-9.
- Nyberg L, Gustafson Y. Patient falls in stroke rehabilitation. A challenge to rehabilitation strategies. *Stroke*. 1995;26(5):838-842.
- Rybar MM, Walker ER, Kuhnen HR, et al. The stroke-related effects of hip flexion fatigue on over ground walking. *Gait & Posture*. 2014;39(4):1103-1108.
- Sommerfeld DK, Eek EUB, Svensson AK, et al. Spasticity after stroke: its occurrence and association with motor impairments and activity limitations. *Stroke*. 2004;35(1):134-139.
- Stansfield BW, Hillman SJ, Hazlewood ME, et al. Regression



- analysis of gait parameters with speed in normal children walking at self-selected speeds. *Gait & Posture*. 2006;23(3):288-294.
- Stolze H, Klebe S, Zechlin, et al. Falls in frequent neurological diseases. *Journal of Neurology*. 2004;251(1):79-84.
- Titianova EB, Mateev PS, Tarkka IM. Footprint analysis of gait using a pressure sensor system. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2004;14(2):275-281.
- Umphred DA, Lazaro RT, Roller M, et al. Neurological rehabilitation. St. Louis. *Elsevier Health Sciences*. 2013.
- Wall JC, Turnbull GI. Gait asymmetries in residual hemiplegia. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1986;67(8):550-553.
- Winter DA, Sienko SE. Biomechanics of below-knee amputee gait. *Journal of Biomechanics*. 1988;21(5):361-367.
- Wojcik LA, Nussbaum MA, Lin D, et al. Age and gender moderate the effects of localized muscle fatigue on lower extremity joint torques used during quiet stance. *Human Movement Science*. 2011;30(3):574-583.
- Yaggie JA, McGregor SJ. Effects of isokinetic ankle fatigue on the maintenance of balance and postural limits. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2002;83(2):224-228.
- Yan T, Hui-Chan CWY, Li LSW. 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):80-85.
- Yang YR, Chen YC, Lee CS, et al. Dual-task-related gait changes in individuals with stroke. *Gait & Posture*. 2007;25(2):185-190.