

만성 뇌졸중 환자의 비마비측 발바닥굽힘근 근피로가 보행 시 양측 하지 근육의 활성도에 미치는 영향

이재웅 · 구현모^{1†}

큰솔병원 물리치료실, ¹경성대학교 물리치료학과

Effects of Fatigue in the Non-paretic Plantarflexor on the Activities of the Lower Leg Muscles during Walking in Chronic Stroke Patients

Jae-Woong Lee, PT, MS · Hyun-Mo Koo, PT, PhD^{1†}

Department of Physical Therapy, Keunsol Hospital

¹Department of Physical Therapy, College of Science, Kyungsung University

Received: June 6, 2019 / Revised: June 10, 2019 / Accepted: June 20, 2019

© 2019 J Korean Soc Phys Med

| Abstract |

PURPOSE: The aim of this study was to obtain detailed and quantified data concerning the effects of plantarflexor fatigue induced to the non-paretic side on muscle activities of the bilateral lower extremities during walking in chronic stroke patients.

METHODS: In this study, chronic stroke patients were evaluated for six months after the onset of stroke. To induce the non-paretic plantarflexor fatigue, 20 chronic stroke patients were asked to perform their given fatigue affecting assignments, which were presented in a forced contraction fatigue test method, until the range of motion of the plantarflexor was reduced to less than 50%. The muscle

activities of the rectus femoris, tibialis anterior and gastrocnemius in the paretic and non-paretic lower extremities were measured using a wireless surface EMG before and after muscle fatigue induction.

RESULTS: The findings showed that after plantarflexor fatigue was induced on the non-paretic side, a significant decrease in muscle activities of the rectus femoris on the paretic side was noted ($p < .05$). The muscle activities of the tibialis anterior and gastrocnemius were also observed to decrease, but, these results were not statistically significant ($p > .05$). In the non-paretic side, there was a significantly decrease in the muscle activities of the rectus femoris, tibialis anterior, and gastrocnemius ($p < .05$).

CONCLUSION: These finding suggest that the muscle fatigue of the non-paretic plantarflexor affects not only the muscle activity of the ipsilateral lower extremity but also the muscles activity of the contralateral lower extremity. This highlights the necessity of performing exercise or training programs that do not cause muscle fatigue in clinical aspects.

Key Words: Chronic stroke, Muscle activation, Muscle fatigue

본 논문은 이재웅(2016)의 석사 학위 논문 발췌본임.

†Corresponding Author : Hyun-Mo Koo

hmkoo@ks.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0003-4231-7527>

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.

I. 서론

뇌졸중이란 뇌에 혈액을 공급하는 혈관 일부분의 막힘이나 터짐으로 인해 해당 부위의 뇌가 손상되어 운동기능의 소실, 시각과 지각의 결손, 감각이상, 연하곤란, 인지 및 언어장애 등 신경학적 증상을 나타내는 질환으로[1,2], 손상된 뇌의 반대측 신체에 다양한 장애를 일으키는 중추신경계의 대표적인 질환이다[3]. 뇌졸중 발병 후 환자의 40%는 기능적인 손상이 남게 되고, 15~30%는 심각한 장애가 지속된다[4]. 임상적 징후로는 통증, 근력약화, 운동감각 장애, 비정상적 근긴장 및 움직임 패턴, 균형소실 등이 있으며 그로 인해 뇌졸중 환자의 50% 이상이 보행장애를 갖게 된다[5].

보행은 신경계통과 근육골격계통 등이 복합적으로 관여하는 매우 복잡한 과정으로 한쪽 하지가 안정적인 디딤기 상태를 유지하는 동안에 반대측 하지가 몸을 전방으로 추진시키는 일련의 반복적 동작이다[6]. 뇌졸중 환자의 보행에는 균형능력의 감소, 근력약화, 관절가동범위와 안정성의 감소, 심리적 상태, 근육 피로 등의 요인들이 영향을 미치고, 특히, 균형조절의 불안정은 마비측의 체중지지 능력을 저하시킴으로써 보행기능에 부정적으로 작용한다[7]. 특히, 뇌졸중 환자는 원시적 협력패턴으로 인해서 선택적인 근육조절 능력이 소실되고, 이로 인한 느린 움직임을 보상하기 위해서 비마비측 신체를 과도하게 사용하게 된다. 이로 인해 마비측의 체중 이동이 어려워져 비대칭적인 보행이 나타나게 된다[8]. 또한, 뇌졸중 환자는 아급성기를 지나면서 근섬유 위축에 의한 근력 약화로 인해 지구력과 보행속도가 감소되어 기능적 재활이 더욱 제한된다[9,10].

뇌졸중 환자의 보행에 있어서 근피로를 유발하는 가장 중요한 요인은 마비측의 근력약화이며, 근피로는 중추신경계통의 시스템 및 기능의 저하로 인한 신경활동 수준의 변화와도 관련된다[11,12]. 피로(fatigue)는 뇌졸중과 같은 신경계통 환자들에게 흔히 동반되는 증상으로 수의적 운동을 담당하는 곁질척수로의 장애나 근활성도 조절과 관련된 그물체척수와의 같은 신경회로의 기능이상에 의해서도 발생될 수 있다[13,14]. 아급

성기 뇌졸중 환자의 근력 수준이 정상인에 비해 마비측 28%, 비마비측 68% 이하로 낮을 뿐만 아니라, 편마비로 인한 지속적인 마비측 비사용 조건이 더해짐으로써 신경학적 및 대사적 기능 제한이 악화되고, 마비측 근육에서 더 쉽게 근피로가 유발된다[15]. 이러한 마비측과 비마비측의 근력차이는 비대칭적인 신체정렬과 체중부하의 불균형을 초래하는 원인이 될 수 있다. 장시간 지속되는 비대칭적 체중지지로 인한 보상적 변화로서 비마비측 하지의 활동이 증가되어 근피로가 초래되고, 신경근육계의 기능 저하를 일으키는 악순환이 초래된다[16]. 특히, 뇌졸중 환자의 보행 시에는 비마비측 하지의 발목관절 발바닥굽힘근의 활동이 증가되어[17] 근피로가 유발될 수 있으며 이는 반대측 체지에서 등척성 토크값의 감소[18]나 근활성도의 감소[19]와 같은 영향을 미칠 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 만성 뇌졸중 환자를 대상으로 비마비측 발바닥굽힘근의 근피로를 유발한 조건에서 보행 시 양측 하지의 근활성도의 변화를 측정하여 분석함으로써 비마비측 근피로가 양측 하지 근육에 미치는 영향을 확인하고자 연구를 실시하였다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상자

OO광역시 소재 OO병원에 입원한 환자 중 뇌졸중으로 진단 받고 6개월 이상 경과한 편마비 환자 20명을 대상으로 연구를 진행하였고, 연구 대상자가 실험 내용을 이해하고 자발적 동의 후 연구에 참여할 수 있도록 연구의 구체적 목적과 방법에 대해 충분히 설명하였다. 구체적인 연구 대상자의 선정조건은 1) 10m 이상 독립적 보행이 가능한 자, 2) 보행기능과 관련된 골반 및 양하지의 정형외과적 문제가 없는 자, 3) 마비측 하지에서 경직의 수준이 MAS(modified ashworth scale) G2 이하인 자, 4) 비마비측 하지의 근력이 도수근력검사(Fair 이상인 자), 5) 연구자의 지시를 이해하고 따르며, 한국판 간이정신상태검사(MMSE-K)에서 24점 이상 얻은 자로 하였다. 본 연구의 대상자 수는 G-power program (Germany)을 이용하여 효과 크기 .88, 유의 수준

.05, 검정력 80%, 탈락율 10%로 설정하여 산출하였다.

본 연구는 사전에 경성대학교 생명윤리위원회 (KyungSung University Institutional Review Board)의 승인(KSU-15-06-001)을 얻은 후 실시하였다.

2. 실험 절차

1) 근피로 유발

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로를 유발하기 위해 Gefen 등[20]의 연구에서 적용한 부하수축 피로검사 (forced contraction fatigue test) 방법을 사용하였다. 연구 대상자가 선 자세를 유지한 상태에서 비마비측 하지의 반복적인 발바닥굽힘을 유도하였다. 이때 마비측 하지의 사용을 제한하기 위하여 20cm 높이의 나무 발판 위에 마비측 발을 위치시켜 고정함으로써, 비마비측 하지로 한발 서기 자세를 취한 상태로 능동적인 발바닥 굽힘(plantar flexion)이 이루어질 수 있도록 통제하였다. 최대 발바닥굽힘 위치에서 1초 동안 유지한 후 다시 발뒤꿈치를 내리는 동작을 반복 수행하도록 하였고, 근피로로 인해서 발바닥굽힘의 관절가동범위가 50% 이하로 감소하였을 때 근피로가 발생한 것으로 판단하고[21], 다음의 실험 절차를 진행하였다.

2) 근활성도 측정

보행주기의 특정 구간에서 근활성도를 측정하기 위하여 압력 감지판에 의해 작동되는 무선 풋 스위치(DTS FootSwitch, Noraxon Inc., USA)를 이용하였다(Fig. 1). 먼저, 무선 풋 스위치를 대상자의 첫째 먼쪽발가락뼈, 첫째 발허리뼈, 발뒤꿈치뼈 부위에 부착하여, 보행주기의 0~10%인 발뒤꿈치 닿기(initial contact)부터 발바닥 닿기(loading response) 단계와 30~60%인 발뒤꿈치 떼기(terminal stance)부터 발가락 떼기(pre-swing) 단계에서 근활성도를 측정하였다(Fig. 2).

보행 시 근피로 유발 전 · 후의 넙다리곧은근, 앞정강근, 장딴지근의 표면 근활성도를 측정하기 위하여 무선 표면 근전도(TeleMyo DTS, Noraxon Inc., USA)를 사용하였다. 피부 저항을 최소화하기 위하여 전극 부착 부위를 알코올로 닦아내고 접지전극과 전해질 젤이 도



Fig. 1. Wireless footswitch (DTS FootSwitch, Noraxon Inc., USA)

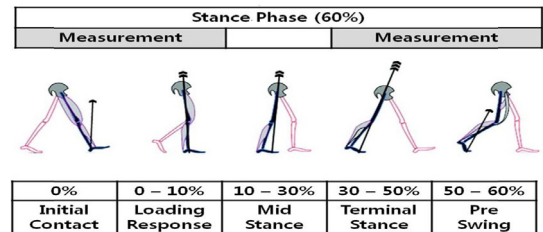


Fig. 2. Measurement the gait duration (Espinosa 등[22])

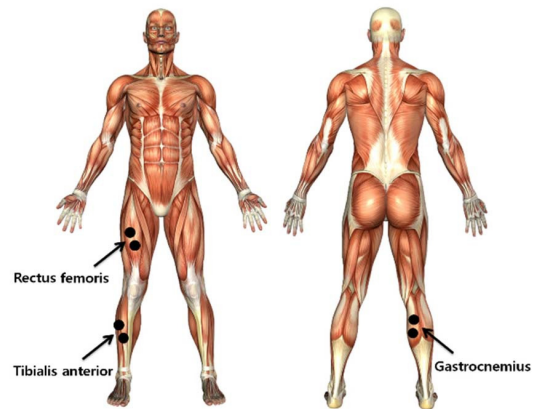


Fig. 3. EMG electrodes attachment part (Hollis [24])

포된 2개의 활성전극을 각 근육에 부착하였다. 근전도 전극의 부착 부위는 Hermens 등[23]의 연구를 참고하여, 넙다리곧은근(rectus femoris)은 위앞엉덩뼈가시 (anterior superior iliac spine)와 무릎뼈의 위쪽 가장자리 사이의 중간 부위, 앞정강근(tibialis anterior)은 정강뼈 선상의 외측 2cm 부위, 내측 장딴지근(gastrocnemius)은 오금 중심선에서 아래 2cm 거리의 내측 표면에 부착하였다(Fig. 3).

3) 근활성도 기록 및 분석

근전도 신호의 처리를 위해 표본 추출률(sampling rate)은 1,000 Hz, 대역 필터(band pass filter)는 20~450 Hz, 노치 필터(notch filter)는 60Hz를 사용하였다. 표면 근전도 신호는 분석 소프트웨어(MyoResearch XP Master Edition, Noraxon Inc., USA)를 이용하여 처리 및 저장하였다. 측정된 모든 근전도 원자료는 RMS (root mean square)로 변환하여 다음과 같은 과정을 통하여 처리하였다. 근전도 신호는 근피로 유발 전·후의 근활성도를 비교하기 위해 특정 동작의 근수축을 기준 수축(reference voluntary contraction, RVC)으로 하고 이를 기준으로 표준화하는 %RVC 방법을 사용하여 표준화 과정을 실시하였다[21]. 기준 수축은 해부학적 자세에서 이완상태로 5초간 지속하여 보행의 특정 구간에 대한 기준 수축으로서 적분근전도(IEMG)값을 구하고, 각 구간의 근육에 대한 적분근전도값과 기준 수축-적분근전도값을 비교하여 %RVC로 각 근육의 근전도 신호를 표준화 하였다.

4) 통계학적 분석

측정된 자료는 SPSS 21.0 Version (IBM SPSS Inc., USA)을 이용하여 통계처리 하였고, 대응표본 t-검정 (paired t-test)을 이용하여 비마비측 하지의 발바닥굽힘근 근피로 유발 전·후에 보행 시 양측 하지의 근활성도를 분석하였다. 통계학적 유의 수준 α 는 .05로 설정하였다.

III. 연구결과

1. 연구 대상자의 일반적 특성

연구 대상자는 남자 12명, 여자 8명으로 총 20명이며, 평균 연령 55.45±11.51세, 평균 신장 167.75±6.70 cm, 평균 체중 67.03±12.50 kg이었다. 연구 대상자의 병력 특성은 전체 대상자 20명 중 출혈성 뇌손상 환자가 8명, 허혈성 뇌손상 환자가 12명이었으며, 오른쪽 편마비가 10명, 왼쪽 편마비가 10명이었다.

2. 비마비측 하지의 근피로 유발 전과 후의 양하지 근육의 근활성도

1) 넙다리곧은근의 근활성도

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 마비측 넙다리곧은근의 근활성도는 근피로 유발 전 413.99±

344.46%RVC에서 근피로 유발 후 352.44±272.25%RVC로 통계학적으로 유의하게 감소하였으며($p<.05$), 비마비측 넙다리곧은근의 근활성도는 근피로 유발 전 262.67±213.87%RVC에서 근피로 유발 후 204.14±167.09%RVC로 통계학적으로 유의한 감소를 나타냈다($p<.05$)(Table 1).

2) 앞정강근의 근활성도

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 마비측 앞정강근의 근활성도는 근피로 유발 전 1124.86±508.31 %RVC에서 근피로 유발 후 1089.96±808.76 %RVC로 감소하였으나 통계학적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며($p>.05$), 비마비측 앞정강근의 근활성도는 근피로 유발 전 1181.19±728.61 %RVC에서 근피로 유발 후 953.14±559.27 %RVC로 통계학적으로 유의한 감소를 나타냈다($p<.05$)(Table 2).

3) 장딴지근의 근활성도

비마비측 발바닥굽힘근의 근피로 유발에 따른 마비측 장딴지근의 근활성도는 근피로 유발 전 579.33±375.56 %RVC에서 근피로 유발 후 562.13±409.52 %RVC로 감소하였으나, 통계학적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며($p>.05$), 비마비측 장딴지근의 근활성도는 근피로 유발 전 602.48±489.33 %RVC에서 근피로 유발 후 459.97±414.53 %RVC로 통계학적으로 유의한 감소를 나타냈다($p<.05$)(Table 3).

IV. 고 찰

본 연구에서는 뇌졸중 발병 후 6개월이 경과한 편마비 환자를 대상으로 비마비측 발바닥굽힘근에 근피로를 유발한 후, 보행 시의 양측 하지 근육의 근활성도를 측정하여 편측 하지의 근피로가 반대측 사지에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 근전도를 이용해 측정된 근활성도는 근력 및 근수행력을 측정할 수 있는 객관적인 자료로 활용되므로[26], 본 연구에서도 무선 표면 근전도를 이용해 양하지의 넙다리곧은근, 앞정강근, 장딴지근의 근활성도를 측정하였다.

비마비측 하지의 발바닥굽힘근 근피로가 보행 시 비마비측 하지의 근활성도에 미치는 영향에 대한 분석

Table 1. Comparison of Activation of Rectus Femoris at Pre-test and Post-test (unit : %RVC)

Side	Pre	Post	p
Paretic	413.99±344.46	352.44±272.25	.019
Non-paretic	262.67±213.87	204.14±167.09	.021

Mean±SD

Table 2. Comparison of Activation of Tibialis Anterior at Pre-test and Post-test (unit : %RVC)

Side	Pre	Post	p
Paretic	1124.86±508.31	1089.96±808.76	.793
Non-paretic	1181.19±728.61	953.14±559.27	.005

Mean±SD

Table 3. Comparison of Activation of Gastrocnemius at Pre-test and Post-test (unit : %RVC)

Side	Pre	Post	p
Paretic	579.33±375.56	562.13±409.52	.766
Non-paretic	602.48±489.33	459.97±414.53	.001

Mean±SD

에서 넙다리곧은근, 앞정강근, 장딴지근의 근활성도가 통계학적으로 유의하게 감소하였음을 확인하였다. 이는 근피로의 영향으로 인해 장딴지근이 근수축 활동에 필요한 충분한 힘을 발휘하지 못하거나 일정하게 유지하지 못하게 되어[27], 근활성도가 감소된 것으로 생각된다. Hassanlouei 등[28]은 정상 성인을 대상으로 자전거 에르고미터를 통해 하지에 근피로를 유발하여 넙다리네갈래근과 뒤넙다리근의 근활성도가 감소함을 보고하였다. Hughes 등[29]도 5명의 만성 뇌졸중 환자를 대상으로 추적과제(tracking task)를 통해 위팔두갈래근과 위팔세갈래근에 근피로를 유발하여 근활성도를 측정 한 결과, 위팔두갈래근은 193.31 μV 에서 80.75 μV , 위팔세갈래근은 152.91 μV 에서 130.18 μV 로 모두 감소하는 것으로 나타나 본 연구 결과와 일치하였다. 장딴지근과 넙다리곧은근은 근육 슬링으로 연결된 구조적 관련성이 높은 근육이므로 근피로가 직접적으로 유발된 장딴지근이 넙다리곧은근에 영향을 미친 것으로 생각된다.

비마비측 하지의 발바닥굽힘근 근피로가 보행 시 마비측 하지의 근활성도에 미치는 영향에 대한 분석에

서 앞정강근과 장딴지근의 근활성도는 감소하였으나 통계학적으로 유의한 차이가 없었으며, 넙다리곧은근의 근활성도는 통계학적으로 유의하게 감소하였다. 이러한 결과는 근피로로 인해 감소된 비마비측 하지의 근활성도가 마비측 하지의 근활성도에 영향을 미친 것으로 생각되며, 이와 같이 마비측과 비마비측의 구조적 및 기능적 관련성을 뒷받침하는 다양한 선행연구들이 보고된 바 있다. 한쪽 체지에 대한 자극이 직접적으로 자극이 주어지지 않은 반대측 체지에도 영향을 미친다는 개념을 반대측 효과라고 하며[30], 이와 관련된 신경학적 및 생역학적 근거를 제시하는 다양한 연구들이 보고되어 왔다. Arányi와 Rösler [31]는 정상 성인을 대상으로 경두개 자기장자극(transcranial magnetic stimulation)을 적용하여 한쪽 새끼손가락별림근의 근피로가 반대측 새끼손가락별림근의 근수축력에 영향을 미침을 확인하였다. Rattey 등[32]은 한쪽 넙다리네갈래근에 근피로를 유발하여 반대측 넙다리네갈래근에 미치는 영향을 M파(M-wave)를 통해 확인한 결과, 근피로 유발 후 반대측 넙다리네갈래근의 근활성도가 유의하게 감소되었

음을 보고하였다. Bodwell 등[33]의 연구에서도 정상 성인 20명과 노인 20명을 대상으로 한쪽 손가락의 태핑(tapping)으로 근피로를 유발하여 노인이 정상 성인에 비해 반대측 효과가 크게 나타난다고 보고하였다. 특히 Rees 등[34]이 4주간의 한쪽 발목 근력운동을 적용한 후 반대측 발목 근력이 26% 향상되었다고 보고한 연구도 반대측 효과의 근거로 활용될 수 있다. 본 연구에서 넙다리곧은근을 제외한 반대측 근육의 근활성도는 감소하였으나 통계학적으로 유의한 차이는 나타나지 않았는데, 이러한 결과는 Todd 등[35]이 보고한 바와 같이 반대측 근육의 운동신경세포를 조절하는 대뇌결질의 출력이 충분하지 못했기 때문이라고 생각된다. 그러나, Rattey 등[32]은 근피로가 유발되는 동안 향상성을 유지하고 손상을 방지하기 위한 예비통제의 결과라는 견해를 제시하기도 하였다.

본 연구의 결과를 종합하면 만성 뇌졸중 환자의 비마비측 발바닥굽힘근의 근피로는 비마비측 하지의 근수축력뿐만 아니라 마비측 하지의 근육 활성도에도 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 측정된 넙다리곧은근, 앞정강근, 장딴지근의 근활성도 만으로는 복잡한 기능적 활동인 보행과 관련된 근육 활성 특성을 일반화하기에는 어려움이 있다고 생각된다. 따라서, 향후에 하지 근육 활동뿐만 아니라 보행에 영향을 미치는 다른 신체부위의 근육 활동과 보행의 상호관련성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

V. 결론

뇌졸중으로 인한 만성 편마비 환자 20명을 대상으로 비마비측 하지의 발바닥굽힘근에 근피로를 유발한 후, 보행 시 양측 하지의 근활성도에 미치는 영향을 확인하였다. 비마비측 하지의 발바닥굽힘근 근피로 유발 후, 마비측 하지에서는 넙다리곧은근의 근활성도가 통계학적으로 유의하게 감소하였고($p < .05$), 앞정강근과 장딴지근의 근활성도는 감소하였으나 통계학적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > .05$). 비마비측 하지에서는 넙다리곧은근, 앞정강근, 장딴지근의 근활성도가 통계학적으로 유의하게 감소하였다($p < .05$). 이를 통해

서 비마비측 발바닥굽힘근의 근피로가 비마비측 하지의 근활성도 뿐만 아니라 마비측 하지의 근활성도를 감소시키는 것을 알 수 있다. 따라서, 임상에서 보행훈련 시에는 근피로의 동측 및 반대측 체지에 대한 영향을 고려하고, 근피로를 최소화할 수 있는 적절한 운동프로그램의 개발과 적용이 필요하다고 판단된다.

Reference

- [1] Peurala SH, Airaksinen O, Jäkälä P, et al. Effects of intensive gait-oriented physiotherapy during early acute phase of stroke. *J Rehabil R D.* 2007;44(5):637-48.
- [2] Braun SM, Beurskens AJ, van Kroonenburgh SM, et al. Effects of mental practice embedded in daily therapy compared to therapy as usual in adult stroke patients in Dutch nursing homes: design of a randomised controlled trial. *BMC Neurol.* 2007;7(1):34.
- [3] O'Sullivan SB, Schmitz TJ. *Physical rehabilitation.* 5th edition. F.A Davis. 2007:705-6.
- [4] Duncan PW, Horner RD, Reker DM, et al. Adherence to post acute rehabilitation guidelines is associated with functional recovery in stroke. *Stroke.* 2002;33(1):167-78.
- [5] Duncan PW, Zorowitz R, Bates B, et al. Management of adult stroke rehabilitation care: a clinical practice guideline. *Stroke.* 2005;36(9):e100-43.
- [6] Perry J. *Gait analysis: normal and pathological function.* Slack Inc. 1992;224-43.
- [7] Stolze H, Klebe S, Zechlin C, et al. Falls in frequent neurological diseases. *J of Neurol.* 2004;251(1):79-84.
- [8] Mauritz KH. Gait training in hemiplegia. *Eur J Neurol.* 2002;9(s1):23-9.
- [9] Kirker KR, Luo Y, Nielson JH, et al. Glycosaminoglycan hydrogel films as bio-interactive dressings for wound healing. *Biomaterials.* 2002;23(17):3661-71.
- [10] Bohannon RW. Muscle strength and muscle training after stroke. *J of Rehabil Med.* 2007;39(1):14-20.
- [11] Hachisuka K, Umezu Y, Ogata H. Disuse muscle atrophy of lower limbs in hemiplegic patients. *Arch Phys Med*

- Rehabil. 1997;78(1):13-8.
- [12] Patten C, Lexell J, Brown HE. Weakness and strength training in persons with poststroke hemiplegia: rationale, method, and efficacy. *J Rehabil R D.* 2004;41(3):293-312.
- [13] Kluger BM, Krupp LB, Enoka RM. Fatigue and fatigability in neurologic illnesses: proposal for a unified taxonomy. *Neurology.* 2013;80(4):409-16.
- [14] McKeivitt C, Fudge N, Redfern J, et al. Self-reported long-term needs after stroke. *Stroke.* 2011;42(5):1398-403.
- [15] Horstman AM, Gerrits KH, Beltman MJ, et al. Intrinsic properties of the knee extensor muscles after subacute stroke. *Arch Phys Med Rehabil.* 2010;91(1):123-8.
- [16] Docherty CL, Arnold BL, Zinder SM, et al. Relationship between two proprioceptive measures and stiffness at the ankle. *J Electromyogr Kinesiol.* 2004;14(3):317-24.
- [17] 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):134-9.
- [18] Doix ACM, Lefèvre F, Colson SS. Time course of the cross-over effect of fatigue on the contralateral muscle after unilateral exercise. *PLOS ONE.* 2013;8(5):e64910.
- [19] Shinohara M, Keenan KG, Enoka RM. Contralateral activity in a homologous hand muscle during voluntary contractions is greater in old adults. *J Appl Physiol.* 2003;94(3):966-74.
- [20] 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.
- [21] Cheng AJ, Rice CL. Factors contributing to the fatigue-related reduction in active dorsiflexion joint range of motion. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2012;38(5):490-7.
- [22] Espinosa N, Brodsky JW, Maceira E. Metatarsalgia. *J Am Acad Orthop Surg.* 2010;18(8):474-85.
- [23] Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, et al. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *J Electromyogr Kinesiol.* 2000;10(5):361-74.
- [24] Hollis LL. *Anatomy of exercise encyclopedia.* Bloomsbury Publishing Plc. 2014;26-9.
- [25] Criswell E. *Cram's introduction to surface electromyography.* Jones & Bartlett Publishers. 2010;49-50.
- [26] Gentili R, Papaxanthis C, Pozzo T. Improvement and generalization of arm motor performance through motor imagery practice. *Neuroscience.* 2006;137(3):761-72.
- [27] Enoka RM, Stuart DG. Neurobiology of muscle fatigue. *J Appl Physiol.* 1992;72(5):1631-48.
- [28] Hassanlouei H, Arendt-Nielsen L, Kersting UG, et al. Effect of exercise-induced fatigue on postural control of the knee. *J Electromyogr Kinesiol.* 2012;22(3):342-7.
- [29] Hughes AM, Freeman CT, Burridge JH, et al. Shoulder and elbow muscle activity during fully supported trajectory tracking in people who have had a stroke. *J Electromyogr Kinesiol.* 2010;20(3):465-76.
- [30] Carroll TJ, Herbert RD, Munn J, et al. Contralateral effects of unilateral strength training: evidence and possible mechanisms. *J Appl Physiol.* 2006;101(5):1514-22.
- [31] Arányi Z, Rösler KM. Effort-induced mirror movements. *Experimental Brain Research.* 2002;145(1):76-82.
- [32] Rattey J, Martin PG, Kay D, et al. Contralateral muscle fatigue in human quadriceps muscle: evidence for a centrally mediated fatigue response and cross-over effect. *Pflügers Archive-European J Physiol.* 2006;452(2): 199-207.
- [33] Bodwell JA, Mahurin RK, Waddle S, et al. Age and features of movement influence motor overflow. *J Am Geriatr Soc.* 2003;51(12):1735-9.
- [34] Rees SS, Murphy AJ, Watsford ML, et al. Effects of proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on stiffness and force-producing characteristics of the ankle in active women. *J Strength Cond Res.* 2007;21(2):572-7.
- [35] Todd G, Petersen NT, Taylor JL, et al. The effect of a contralateral contraction on maximal voluntary activation and central fatigue in elbow flexor muscles. *Experimental Brain Research.* 2003;150(3):308-13.