KJSB Korean Journal of Sport Biomechanics 2020; 30(3): 247-253
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2020.30.3.247
http://e-kjsb.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

Effects of Real-time Visual Feedback Gait Training on Gait Stability in Older Adults

실시간 시각적 피드백 보행 훈련이 노인들의 보행 안정성에 미치는 영향

Kyungseok Byun[1], Sooji Han[2], Dawon Bhang[3], Hyundam Seo[4], Hyo Keun Lee[1]

[1]Vector Bio, Inc., Yongin, South Korea
[2]Department of Sport Biomechanics, Korea National Sport University, Seoul, South Korea
[3]School of Information, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA
[4]Graduate School of Engineering & Technology, Korea University, Seoul, South Korea

Received : 07 September 2020
Revised : 29 September 2020
Accepted : 06 October 2020

Corresponding Author
Hyo Keun Lee
Vector Bio, Inc., 401, Seoksungro 886, Cheoingu, Yonginsi, 17024, South Korea
Tel : +82-31-334-6678
Fax : +82-31-334-6689
Email : leehk82@gmail.com

Objective: This study aimed to examine the effects of real-time visual feedback gait training on gait stability in older adults.

Method: Twelve older adults participated in this study, being divided into 2 groups including a) visual feedback (VF) and b) non-visual feedback (NVF) groups. For 4 weeks, VF performed a treadmill walking training with real-time visual feedback about their postural information while NVF performed a normal treadmill walking training. For evaluations of gait stability, kinematic data of 15-minute treadmill walking were collected from depth-based motion capture system (30 Hz, exbody, Korea). Given that step lengths in both right and left sides were determined based on kinematic data, three variables including step difference, coefficient of variation, approximate entropy were calculated to evaluate gait symmetry, variability and complexity, respectively.

Results: For research findings, VF exhibited significant improvements in gait stability after 4-week training in comparison to NVF, particularly in gait symmetry and complexity measures. However, greater improvement in gait variability was observed in NVF than VF.

Conclusion: Given that visual feedback walking gives potential effectiveness on gait stability in older adults, gait training with visual feedback may be a robust therapeutic intervention in people with gait disturbances like instability or falls.

Keywords: Visual feedback, Gait stability, Step symmetry, Step variability, Step complexity, Older adults

INTRODUCTION

보행은 인간이 이동을 하기 위한 가장 기본적인 형태의 기능적 움직임으로써 일상생활 속에서 간단하고 쉽게 수행되는 형태의 운동이다. 하지만, 신체의 근골격계와 신경계는 복잡하고 예민한 매커니즘을 통해서 보행 운동을 만들어낸다(Kuo & Donelan, 2010; Della Croce, Riley, Lelas & Kerrigan, 2001). 오래전부터 보행의 복잡한 매커니즘을 이해하기 위해 근 신경 역학적 기전에 대한 다양한 보행 이론은 연구되어져 왔다(Winter, 1991). 인간의 보행에 대한 관심과 연구는 신체 근골격계의 기능적 부분을 이해하기 위한 생체역학적 연구 뿐만 아니라, 신경학 및 심리학적 접근을 통한 신경역학적 보행 연구도 많이 수행되어져 오고 있다. 특히, 신경역학적 연구를 통해, 시지각을 담당하는 인지적 기능의 역할과 신체 협응력에 대한 이해의 중요성은 인간의 보행 안정성에 매우 중요한 요인으로 강조되고 있다(Aoi et al., 2019; Amboni, Barone & Hausdorff, 2013;

Copyright © 2020 Korean Journal of Sport Biomechanics
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 noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ijmker & Lamoth, 2012).

65세 이상 노인의 근골격계 상해의 대표적인 원인으로 보행 중 낙상으로 인한 상해로 보고되고 있다(Terroso, Rosa, Marques & Simoes, 2014). 따라서, 노인의 보행 기능과 안정성에 대한 관심과 연구는 지속적으로 증가하고 있다. 나이가 들어가면서 겪게 되는 보행 기능 문제는 잘못된 보행 습관과 퇴행성 근골격계 문제(예, 근감소증, 골감소증)로 부터 나타날 수 있는 근력의 저하, 그리고 인지 기능의 저하와 같은 신경학적 문제로 부터 나타날 수 있다(Perez-Sousa et al., 2019; Kim & Won, 2019). 특히 보행 안정성 저하는 노인의 보행 중 낙상의 위험을 가져오게 하는 핵심적인 요인으로 보고되고 있는데(Hamacher et al., 2019), 이는 노인의 근골격계의 생체역학적 문제로부터 발생할 뿐만 아니라, 시지각 정보처리 능력에 대한 인지 기능 저하와 같은 형태의 신경학적 원인이 주된 요인으로 보고되기도 한다. 이를 위한 해결책으로 다양한 형태의 근골격계 저항 운동 훈련 또는 인지 신경계 자극 훈련 방법 등이 선행 연구를 통해 효과적인 훈련 및 재활 방법으로 제시되어 왔다(Washabaugh, Augenstein & Krishnan, 2020; De Paz et al., 2019).

특히 감각적 피드백을 통한 훈련 방법은 운동과 시지각을 담당하는 기저핵, 소뇌 및 전두엽 피질에 해당하는 신경계의 활성화를 촉진하고 이를 통해 보행 기능을 향상시킬 수 있는 연구 결과가 보고되었다(Ashoori, Eagleman & Jankovic, 2015; Floyer-Lea & Matthews, 2004). 예를 들어 리듬을 갖고 있는 소리(메트로놈)와 같은 형태의 청각적 정보는 보행의 패턴을 변화시키고 보행의 가변성을 낮춰준다는 결과가 보고되었다(Hamacher, Hamacher, Herold & Schega, 2016). 또한 실시간 시각적 피드백을 제공하는 보행 훈련은 운동 계획과 수행의 인지적 활동을 요구하기 때문에 인지기능을 담당하는 전두엽 피질을 활성화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 이를 통해 운동을 담당하는 운동 피질과의 기능적 소통을 더 촉진시킬 수 있다는 보고가 있었다(Calabrò et al., 2017). 하지만 그 동안 시각적 생체 신호 피드백을 주는 형태의 보행 훈련은 촬영 영상 또는 거울을 통해 걷는 자세를 보여주는 피드백 훈련의 형태가 대부분 이었다. 보행을 하는 동안 보행 자세에 대한 생체역학적 정보를 실시간으로 함께 제공하는 것은 쉽지 않았다. 따라서 보행 중 시각적으로 자세를 확인하고 있음에도 불구하고 객관적인 정보가 없기 때문에 정확히 보행 자세를 판단하는 것은 어렵고 자세를 교정하는 것은 제한적일 수 있다. 따라서, 시각적 피드백을 통한 보행 훈련의 효과성을 극대화하기 위해서는 보행 자세의 객관적인 생체역학적 정보(예, 관절각, 보폭 길이, 몸통 기울임)를 함께 제공하는 것이 요구된다(Tate & Milner, 2010).

따라서, 본 연구의 목적은 실시간 시각적 자세 피드백을 통한 보행 훈련이 노인들의 보행 안정성 향상에 얼마나 영향을 미치는지 생체역학적으로 규명하는데 있다. 실시간으로 정량적 데이터를 포함한 시각적 자세 피드백을 제공하는 보행 훈련을 4주 간 수행하고, 훈련의 사전 사후 검증을 통해 피드백 효과성을 검증하고자 하였다. 보행 안정성을 평가하기 위해 보폭 길이의 데이터를 활용한 3가지 생체역학적 보행 안정성 변인(보폭 균형성, 보폭 가변성, 보폭 복잡성)을 산출하였다. 그리고 4주 간의 시각적 피드백 보행 훈련을 받은 노인은 일반적인 보행 운동을 한 노인보다 보행 안정성이 더 많이 향상 될 것이라는 가설과 함께 본 연구를 수행하였다.

METHOD

1. 연구참여자

본 연구를 위해 하지 근골격계와 신경계에 이상이 없는 노인 12명(나이: 68.5±3.4 yrs, 키: 163.3±8.9 cm, 몸무게: 68.8±12.3 kg, MMSE: 26±2.4)이 실험 대상자로 참여하였다. 시각적 피드백의 보행 훈련 효과를 검증하기 위해 12명의 노인은 피드백 훈련(VF) 그룹 6명(여 3, 남 3)과 비 피드백 훈련(NVF) 그룹 6명(여 3, 남 3)으로 나누어 연구를 진행하였다. 연구 목적에 맞는 실험 대상자 선별을 위해 참여자의 인지 기능 평가(MMSE, Mini-Mental State Examination)를 수행하였고, 24점 이상의 정상 인지 기능의 범주 안에 있는 대상자를 연구에 참여시켰다. 모든 대상자들에게 실험에 참여하기 전 연구 목적과 실험 절차에 대한 충분한 설명을 하고 연구 참여 동의서를 받았다.

2. 자료수집

생체역학적 보행 기능 평가는 총 2회(보행 훈련 전과 후)로 트레드밀 보행 검사로 수행되었다. 생체역학적 보행 분석을 위해 키넥트 카메라를 이용한 뎁스 기술 기반 3차원 동작 분석 시스템(30 Hz, exbody, Korea)를 이용하여 트레드밀 보행을 촬영하였다(Figure 1, A). 시각적 피드백이 전혀 없는 일반적인 상황에서의 15분 간의 트레드밀 보행을 측정하고 보행 기능을 평가하였다. 보행 기능 평가를 위해 각 피험자마다 선호하는 보행속도를 선정하였고, 각각의 피험자의 훈련 전후 2회의 보행 기능 평가를 위해 보행속도는 동일하게 적용하였다.

실시간 시각적 자세 피드백이 보행 안정성에 미치는 영향을 검증하기 위해 모든 피험자는 4주 동안(1주 3회, 총 12회) 보행 훈련에 참여하였다. 피드백 훈련과 비 피드백 훈련의 차이를 검증하기 위해 12명의 피험자는 각각 6명 씩 시각적 피드백(VF)과 비 시각적 피드백(NVF) 그룹으로 나누어 참여하였다. VF 그룹의 보행 훈련은 트레드밀 위에서 30분 동안 보행을 하는 동안 스크린을 통해서 보행 자세의 정보를 실시간으로 피드백을 제공 받는 형태로 보행 훈련이 수행되었다. 실시간 시

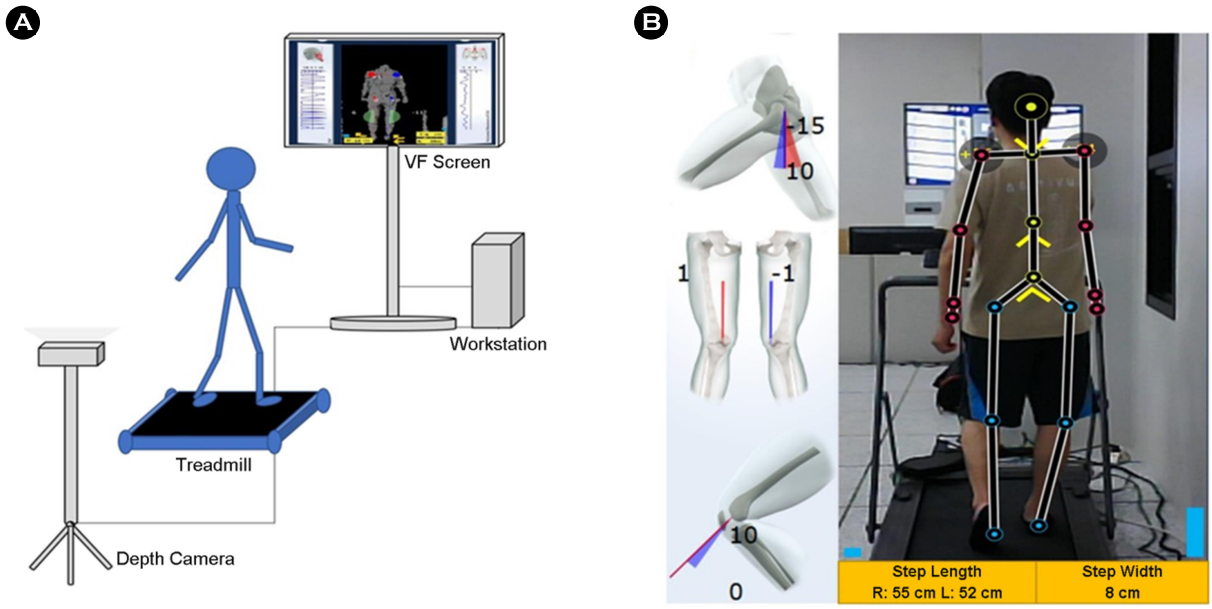

Figure 1. (A) An experimental setup for 4-week treadmill gait training, (B) A customized program for visual feedback training to provide biomechanical information of gait

각적 자세 피드백을 제공하기 위해 보행 분석 시 사용된 뎁스 영상 카메라가 사용되었고, 이를 통해 피험자의 보행 자세에 대한 생체역학적 정보는 실시간으로 스크린에 제공되었다. 이를 통해, 피험자는 실시간으로 제공되는 시각적 피드백을 통해 자신의 보행을 교정하는 형태의 훈련이다. 시각적 자세 피드백은 1) 좌우 어깨의 균형, 2) 목의 좌우 전후 기울임 균형, 3) 척추의 좌우 기울임 균형에 대한 정보가 영상과 정량적 수치로 제공되었다(Figure 1, B).

NVF 그룹의 보행 훈련은 동일한 트레드밀 위에서 피드백이 없는 일반 보행 훈련으로 수행되었다. 트레드밀 보행 훈련을 위해 보행 기능 평가에서 선정된 각 피험자의 선호하는 보행 속도가 4주 간의 모든 보행 훈련에 동일하게 적용되었다. 일반 지면 보행과 유사한 환경의 보행을 위해 트레드밀의 손잡이는 사용하지 않았고, 65세 이상의 노인 피험자의 안전을 위해 안전 장치가 있는 트레드밀을 사용하였다.

3. 자료분석

보행 분석은 키넥트 기반의 보행 분석 시스템(RMT Gait Analysis, exbody, Korea)를 이용하여 생체역학적 보행 변인을 산출하였다. 보행 안정성 평가를 위해 4주 간의 보행 훈련 전후 14분의 트레드밀 보행을 측정하였다. 트레드밀 보행의 시공간 보행 변인을 산출하기 위해 보행 주기는 스텝 길이(Step Length)를 산출하는 것을 기준으로 정의 되었다. 신체의 무게중심(CoM, Center of Mass)의 전후 방향의 위치 좌표 값(CoMy)에서 오른발이 신체의 앞 쪽 방향으로 가장 멀리 떨어지는 시점일 때의 발의 위치 좌표 값(Right Footy) 거리를 산출하고, 이때 CoM와 왼발의 거리를 산출하여 두 거리의 합을 오른발의 보폭 길이(R Step Length)로 정의하였다. 마찬가지로 왼발의 보폭 길이(L Step Length)도 신체의 무게중심과 왼발과 오른발 사이의 거리 정보를 통해 산출하였다. 양 발의 보폭 길이와, 보행의 좌우 균형을 평가하기 위해 보폭 좌우 균형(Step Symmetry)은 아래의 공식과 같이 산출하였다.

<보폭 길이>

$$Step\ Length = (\text{Right Footy} - \text{CoMy}) + (\text{CoMy} - \text{Left Footy})_{\substack{\text{at event} \\ \text{(maximum distance between Right Footy−CoM)}}}$$

$$L\ Step\ Length = (\text{Light Footy} - \text{CoMy}) + (\text{CoMy} - \text{Reft Footy})_{\substack{\text{at event} \\ \text{(maximum distance between Light Footy−CoMy)}}}$$

<좌우 균형>

$$Step\ Symmetry\ (percentage) = \frac{\text{Average (Right 500 Step Length)} - \text{Average (Left 500 Step Length)}}{\text{Average (Right 500 Step Length)}} * 100$$

또한 보행 안정성 평가를 위해 보행 보폭 길이를 이용하여 15분 보행의 보폭 가변성(Step Variability) 및 복잡성(Step Complexity)을 평가하였다. 15분 보행 처음과 끝의 30초에 해당하

Table 1. Results of step symmetry (%difference between right and left sides of step length), step variability (CV, Coefficient of Variation), and step complexity (ApEn, Approximate Entropy) at pre and post training

Variables	VF			NVF		
	Pre	Post	*p*	Pre	Post	*p*
Step symmetry	0.085±0.07	0.059±0.05	.015	0.092±0.08	0.089±0.07	.556
Right step variability (CV)	3.87±0.56	3.64±0.67	.237	4.01±0.76	3.67±0.52	.045
Left step variability (CV)	2.51±0.43	2.37±0.41	.491	3.98±0.6	3.65±0.43	.062
Right step complexity (RApEn)	0.95±0.13	1.15±0.18	.027	0.89±0.17	0.87±0.13	.476
Left step complexity (LApEn)	1.01±0.23	1.17±0.21	.032	0.98±0.21	0.95±0.13	.721

Note. significant at *$p<.05$
Abbreviation. VF, Visual Feedback; NVF, Non-Visual Feedback; CV, Coefficient of Variation; ApEn, Approximate Entropy

는 데이터를 제외한 총 14분의 데이터(양 발 보폭 길이 각각 700회)가 보행 분석에 사용되었다. 보폭 가변성을 평가하기 위해 Coefficient of Variation (CV)을 산출하였고, 보폭 복잡성을 산출하기 위해 Approximate Entropy (ApEn)을 산출하였다. ApEn은 연속적인 시간 속에서 측정된 데이터의 반복성과 규칙성을 설명하는 대표적인 비선형 데이터 분석 변인으로, 인체 움직임의 균형 또는 안정성을 평가하는데 사용되어진다(Yentes et al., 2013). ApEn의 계산 원리는 데이터 포인트 사이의 차이(관계)에 대한 확률의 값을 추정하는 것으로, 일정한 반복성 또는 일률적인 패턴이 지속적으로 나타나는 경우 낮은 ApEn 값을 나타내고, 그 데이터의 패턴의 반복성이 떨어지거나 규칙적이지 않은 경우 ApEn 값이 높게 산출 된다. 본 연구에서는, ApEn 값을 산출하기 위해 데이터의 윈도우크기(m=2)와 데이터와 데이터 사이의 관계에 대한 확률의 값을 결정하는 역치 값(Threshold, $r=0.2$)을 적용하였다(Yentes et al., 2013). 그리고 데이터 갯수(N)는 양 발 각각 700회 보폭 길이에 대한 값을 이용하여 ApEn을 산출하였다. 또한, 양 발의 각각 700개의 보폭 길이 정보를 이용한 무작위 임의 테스트를(surrogate data test) 시행하여 산출된 ApEn 값의 신뢰성을 검증하였다(Preatoni, Ferrario, Donà, Hamill & Rodano, 2010).

4. 통계분석

본 연구는 시각적 피드백의 효과성 검증의 파일럿 연구로서 각 그룹당 6명, 총 12명이 연구에 참여하였다. 좌우 균형에 대한 데이터는 정규성 분포 검사를 통해 데이터의 정규 분포가 나타나지 않았기 때문에, Mann-Whitey 비모수 검정을 사용하여 VF와 NVF 두 그룹 간의 차이를 분석하여 시각적 피드백 보행 훈련의 효과를 검증하였다. 가변성과 복잡성을 평가한 CV와 ApEn의 데이터는, 공분산분석(Ancova)를 사용하여 사전 점수를 공변량으로 지정하여 트레이닝 효과성에 대한 사후 검정을 시행하였다. 모든 통계처리는 SPSS 프로그램을 이용하였고, 유의수준은 $p<.05$로 설정하였다.

RESULTS

VF 그룹에서는 4주 동안의 시각적 피드백 보행 훈련 후에 Step Symmetry ($p=0.015$)와 양 발의 Step Complexity(오른발 $p=.027$, 왼발 $p=.032$)의 변인이 유의하게 향상되는 것으로 나타났다. 하지만 양 발의 Step Variability는 4주 보행 훈련의 효과성이 나타나지 않았다. VF 그룹과는 반대로 NVF 그룹은, 4주간의 보행 훈련 후에 오른발의 Step variability ($p=0.045$)만 통계적인 유의한 변화가 있었으나, Step Symmetry ($p=.156$), Step Complexity ($p=.786$), 그리고 왼발의 Step Variability ($p=.062$)는 훈련 전후의 통계적인 차이가 나타나지 않았다(Table 1).

또한, 4주 보행 훈련 후의 보행 안정성에 대한 VF와 NVF 그룹 간의 차이의 결과에서는, Step Symmetry ($p=.023$)와 양 발의 Step Complexity ($p=.016$, $p=.042$)의 변인에서 그룹 간의 유의한 차이가 있었고, Step Variability ($p=.341$)에서는 그룹 간의 유의한 차이가 없었다(Figure 2).

DISCUSSION & CONCLUSION

실시간 시각적 자세 피드백 보행 훈련이 노인의 보행 안정성에 미치는 영향을 찾기 위해 보폭 길이에 대한 균형성(Step Symmetry), 가변성(Step Variability) 및 복잡성(Step Complexity)를 평가하였다. 본 연구를 통해 4주 동안 시각적 피드백 보행 훈련을 받은 노인들은 보행 안정성이 향상 된다는 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 좌우 양 발의 보폭 길이의 편차가 줄어드는 보행 균형성이 향상되었고, 보폭 길이 패턴의 반복성이 줄어들고 복잡성이 상승하는 결과를 나타냈다. 반면에, 피드백 없이 일반적인 보행 운동을 4주 간 시행한 노인들은 보행 안정

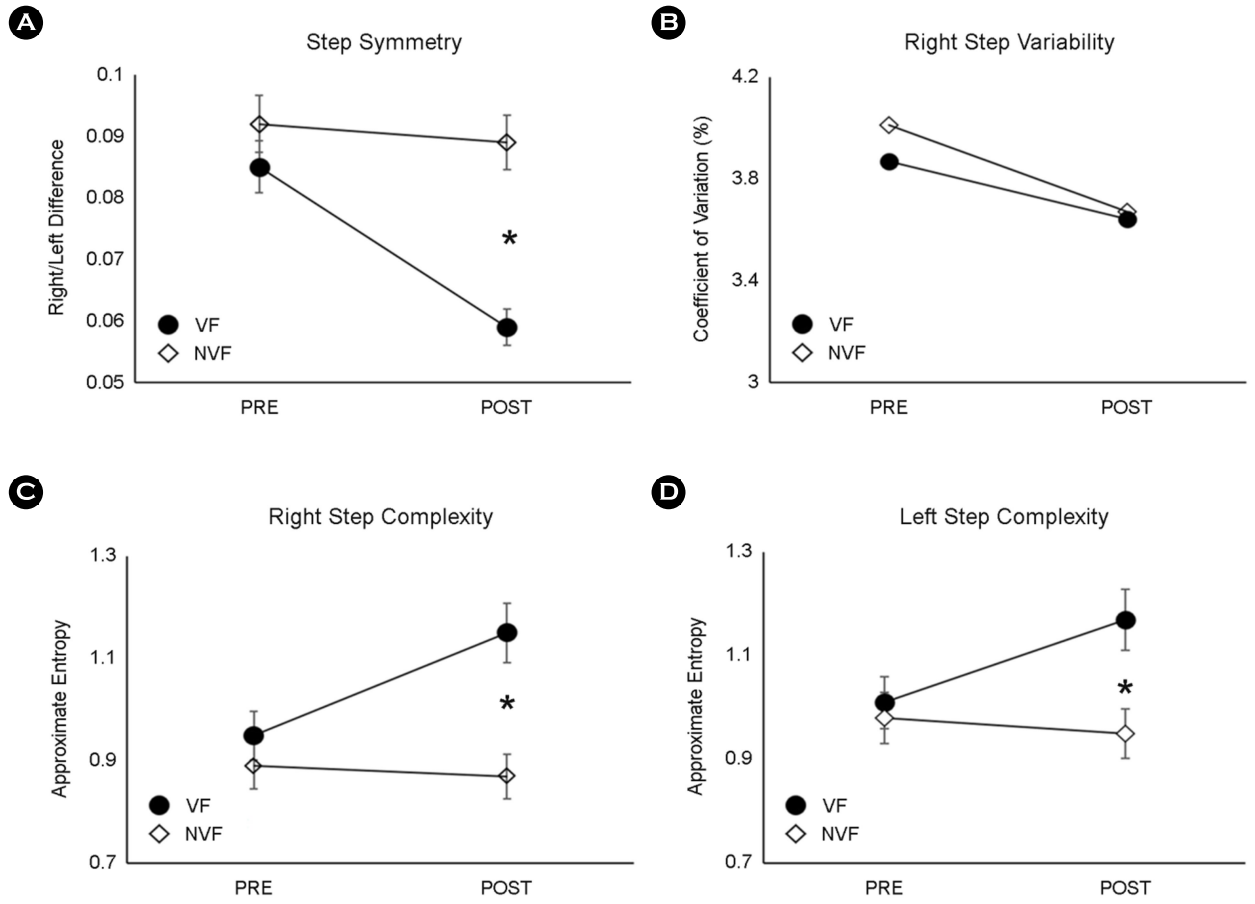

Figure 2. Graphs show Step Symmetry, Step Variability and Step Complexity at Pre and Post trainings in VF and NVF, and asterisk indicate a statistical significance between VF and NVF groups.

성의 생체역학적 평가에서 유의미한 변화를 나타내지 않았다.

보행 시 좌우 균형에 대한 평가는 보행 안정성을 판단하는 핵심적인 요인으로 고려된다(Rispens et al., 2016). 특히 노인의 보행과 낙상의 관계에 대한 선행 연구는 보행 시 좌우 불균형이 노인의 낙상 위험의 큰 요소로 작용한다고 보고하였다(Kikkert et al., 2017). 특히, 보행 시 나타날 수 있는 불균형의 형태는 양쪽 하지 근력에 대한 차이에서 나타나기도 하며, 골반의 틀어짐과 같은 골격계의 좌우 불균형으로 부터 나타나기도 한다. 이러한 하지 근골격계의 불균형은 보행 시 양 발 보폭 길이에 대한 차이를 만들어내고, 불안정한 보행 형태를 보이며 낙상을 유발하는 원인이 된다(LaRoche, Cook & Mackala, 2012).

본 연구에서 수행된 시각적 자세 피드백 보행 훈련은 훈련 참여자가 직접 본인의 보행에 대한 생체역학적 정보를 실시간으로 인지할 수 있는 보행 훈련이었다. 보폭 길이에 대한 정보, 하지 관절 움직임 가동 범위에 대한 정보 및 몸통 기울임에 대한 정보를 획득 함으로써 피험자 스스로 보행 자세와 패턴을 인지하고 잘못된 보행 부분을 실시간으로 교정하는 것이 본 훈련의 목적이었다. 먼저, 4주 간의 시각적 피드백 훈련을 받는 노인들은 양 발 보폭 길이의 편차가 줄어든다는 결과를 가져왔다. 이러한 결과는, 거울을 통한 시각적 피드백 보행 훈련이 보행의 패턴의 변화를 가져온다는 선행 연구와 유사한 결과를 나타냈다(Barton, De Asha, van Loon, Geijtenbeek & Robinson, 2014). 처음 피드백 훈련을 실시할 때는 훈련자들이 시각적 정보를 보고, 읽고, 처리하는 인지처리 과정에 어려움을 겪기도 했다. 이는 보행이라는 운동을 하는 동시에 다양한 정보를 처리해야 하는 이중 과제(Dual Task)의 수행으로부터 겪는 어려움 일 것이다. 하지만 피드백 훈련은 운동 기전의 기초에 해당하는 정보 획득, 운동 계획 및 수행을 담당하고 있는 신경계(예, 전두엽 피질, 운동 피질)를 자극하고 그 기전을 활성화시킬 수 있다(Ohsugi, Ohgi, Shigemori & Schneider, 2013). 4주 간의 피드백 보행 훈련은 시각적으로 제공하는 정보를 처리함과 동시에 지속적인 운동 훈련을 통해 전두엽 피질과 운동 피질을 자극시킬 수 있었고, 이는 궁극적으로 노인의 보행

자세 교정과 동시에 양 발의 보폭의 균형을 맞추는 역할을 했을 것으로 사료된다. 특히, 본 연구에서는 단순히 보행하는 모습을 보여주는 시각적 정보 뿐만 아니라 하지 관절의 움직임 또는 보폭 길이에 대한 정량적 정보를 실시간으로 인지함으로써 피험자들이 빠른 기간(4주 이내) 안에 보행 균형성을 향상시킬 수 있었다. 이러한 결과는 생체 신호 피드백을 통한 훈련이 운동을 담당하는 운동 피질 신경계를 적극적이고 효율적으로 자극함으로써 운동의 효과를 극대화할 수 있다는 가능성을 설명한다.

또한 4주 간의 시각적 피드백 훈련은 노인 보행의 보폭에 대한 반복성을 떨어뜨리고 복잡성을 향상 시켰다. 이러한 결과는 다이나믹 시스템 이론에 근거한 인간의 보행이 복잡한 형태이지만 특정한 규칙을 갖고 있는 형태로써 안정성이 향상될 수 있다는 선행 연구의 제안과 일치한다(Decker, Cignetti & Stergiou, 2010). 특히, 노인은 정보처리 기능과 운동 신경계의 기능이 떨어지면서 다양한 외부 자극 및 변화로부터의 적절한 반응이 이뤄지지 않고 보행 시 보행 패턴에 대한 엔트로피 값이 떨어지고 보행 안정성이 저하되는 결과를 제시하였다(Bisi, Riva & Stagni, 2014; Karmakar, Khandoker, Begg, Palaniswami & Taylor, 2007). 이는 보행의 복잡성이 낮아짐과 동시에 운동 제어 기능의 자유도가 떨어짐을 설명할 수 있다(Kaipust, Huisinga, Filipi & Stergiou, 2012). 본 연구에서, 시각적 피드백 보행 훈련을 통해 노인의 보폭 복잡성이 향상된 결과는 15분 이상의 중/장거리 걸음에서 획일적인 보행 패턴을 유지하는 것이 아니라, 보행 운동 시 시지각에 의해 처리되고 있는 다양한 외부 요인과 체력의 저하와 같은 피로감 같은 생체역학적 정보를 유연하게 반응할 수 있는 기능이 향상되었다는 결론을 얻었다. 하지만 보폭 가변성의 결과는 복잡성과는 다르게 나타났는데, 이는 다이나믹 시스템 이론에서 제시한 복잡성과 가변성의 관계와 일치하는 결과로 나타난다(Stergiou & Decker, 2011). 15분 동안 일관적인 보행 패턴을 보이는 것이 이상적인 보행 안정성을 보이는 것이 아니라, 적절한 가변성을 포함한 질적으로 향상된 보행 패턴을 나타내는 것이 보행 안정성의 측면에서 이상적이라는 결론을 내릴 수 있다.

본 연구는 뎁스 기술 기반의 3차원 동작 분석과 보행 훈련이 함께 이뤄진 연구로써, 노인의 보행 안정성을 향상시킬 수 있는 적절한 운동 프로토콜을 제시할 수 있을 것으로 기대한다. 비록 적은 피험자 수와 트레드밀 보행이라는 제한적인 환경에서 연구가 수행되었지만, 실시간 시각적 자세 피드백을 제공하여 보행 훈련 효과를 검증하는 의미 있는 연구 결과라고 볼 수 있다. 또한 홈트레이닝에 대한 관심과 재활 병원에서의 생체역학적 프로토콜 적용에 대한 관심을 볼 때, 본 연구에서 수행된 피드백 보행 훈련 연구 프로토콜은 충분한 가능성이 있다고 보여진다. 고령화가 되면서 노인 낙상의 위험에 대한 다양한 보고와 함께, 노인의 보행 안정성에 대한 관심과 연구는 오래 전부터 지속되어 왔다. 다양한 나이대의 피험자 그룹과 뇌질환으로 부터 오는 다양한 운동 질환(예, 파킨슨 병, 뇌졸중 등)의 피험자를 대상으로 다양한 바이오 피드백 보행 훈련에 대한 효과성 검증이 수행된다면, 보행에 대한 신경역학적 매커니즘을 구체적으로 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

Amboni, M., Barone, P. & Hausdorff, J. M. (2013). Cognitive contributions to gait and falls: evidence and implications. *Movement Disorders*, *28*(11), 1520-1533.

Aoi, S., Ohashi, T., Bamba, R., Fujiki, S., Tamura, D., Funato, T. ... & Tsuchiya, K. (2019). Neuromusculoskeletal model that walks and runs across a speed range with a few motor control parameter changes based on the muscle synergy hypothesis. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-13.

Ashoori, A., Eagleman, D. M. & Jankovic, J. (2015). Effects of auditory rhythm and music on gait disturbances in Parkinson's disease. *Frontiers in Neurology*, *6*, 234.

Barton, G. J., De Asha, A. R., van Loon, E. C., Geijtenbeek, T. & Robinson, M. A. (2014). Manipulation of visual biofeedback during gait with a time delayed adaptive Virtual Mirror Box. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *11*(1), 101.

Bisi, M. C., Riva, F. & Stagni, R. (2014). Measures of gait stability: performance on adults and toddlers at the beginning of independent walking. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *11*(1), 1-9.

Calabrò, R. S., Naro, A., Russo, M., Leo, A., De Luca, R., Balletta, T. ... & Bramanti, P. (2017). The role of virtual reality in improving motor performance as revealed by EEG: a randomized clinical trial. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *14*(1), 53.

Decker, L. M., Cignetti, F. & Stergiou, N. (2010). Complexity and human gait. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, *3*(1), 2-12.

Della Croce, U., Riley, P. O., Lelas, J. L. & Kerrigan, D. C. (2001). A refined view of the determinants of gait. *Gait & Posture*, *14*(2), 79-84.

De Paz, R. H., Serrano-Muñoz, D., Pérez-Nombela, S., Bravo-Esteban, E., Avendaño-Coy, J. & Gómez-Soriano, J. (2019). Combining transcranial direct-current stimulation with gait training in patients with neurological disorders: a systematic review. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *16*(1), 114.

Floyer-Lea, A. & Matthews, P. M. (2004). Changing brain net-

works for visuomotor control with increased movement automaticity. *Journal of Neurophysiology*, *92*(4), 2405-2412.

Hamacher, D., Hamacher, D., Herold, F. & Schega, L. (2016). Effect of dual tasks on gait variability in walking to auditory cues in older and young individuals. *Experimental Brain Research*, *234*(12), 3555-3563.

Hamacher, D., Liebl, D., Hödl, C., Heßler, V., Kniewasser, C. K., Thönnessen, T. & Zech, A. (2019). Gait stability and its influencing factors in older adults. *Frontiers in Physiology*, *9*, 1955.

IJmker, T. & Lamoth, C. J. (2012). Gait and cognition: the relationship between gait stability and variability with executive function in persons with and without dementia. *Gait & Posture*, *35*(1), 126-130.

Kaipust, J. P., Huisinga, J. M., Filipi, M. & Stergiou, N. (2012). Gait variability measures reveal differences between multiple sclerosis patients and healthy controls. *Motor Control*, *16*(2), 229-244.

Karmakar, C. K., Khandoker, A. H., Begg, R. K., Palaniswami, M. & Taylor, S. (2007). Understanding ageing effects by approximate entropy analysis of gait variability. In *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 1965-1968). IEEE.

Kikkert, L. H., De Groot, M. H., van Campen, J. P., Beijnen, J. H., Hortobágyi, T., Vuillerme, N. & Lamoth, C. C. (2017). Gait dynamics to optimize fall risk assessment in geriatric patients admitted to an outpatient diagnostic clinic. *PloS One*, *12*(6), e0178615.

Kim, M. & Won, C. W. (2019). Sarcopenia is associated with cognitive impairment mainly due to slow gait speed: Results from the Korean Frailty and Aging Cohort Study (KFACS). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(9), 1491.

Kuo, A. D. & Donelan, J. M. (2010). Dynamic principles of gait and their clinical implications. *Physical Therapy*, *90*(2), 157-174.

LaRoche, D. P., Cook, S. B. & Mackala, K. (2012). Strength asymmetry increases gait asymmetry and variability in older women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *44*(11), 2172.

Ohsugi, H., Ohgi, S., Shigemori, K. & Schneider, E. B. (2013). Differences in dual-task performance and prefrontal cortex activation between younger and older adults. *BMC Neuroscience*, *14*(1), 10.

Perez-Sousa, M. A., Venegas-Sanabria, L. C., Chavarro-Carvajal, D. A., Cano-Gutierrez, C. A., Izquierdo, M., Correa-Bautista, J. E. & Ramírez-Vélez, R. (2019). Gait speed as a mediator of the effect of sarcopenia on dependency in activities of daily living. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, *10*(5), 1009-1015.

Preatoni, E., Ferrario, M., Donà, G., Hamill, J. & Rodano, R. (2010). Motor variability in sports: a non-linear analysis of race walking. *Journal of Sports Sciences*, *28*(12), 1327-1336.

Rispens, S. M., Van Dieën, J. H., Van Schooten, K. S., Lizama, L. E. C., Daffertshofer, A., Beek, P. J. & Pijnappels, M. (2016). Fall-related gait characteristics on the treadmill and in daily life. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *13*(1), 12.

Stergiou, N. & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, *30*, 869-888.

Tate, J. C. & Milner, C. E. (2010). Real-time kinematic, temporo-spatial, and kinetic biofeedback during gait retraining in patients: a systematic review. *Physical Therapy*, *90*, 1123-1134.

Terroso, M., Rosa, N., Marques, A. T. & Simoes, R. (2014). Physical consequences of falls in the elderly: a literature review from 1995 to 2010. *European Review of Aging and Physical Activity*, *11*(1), 51-59.

Washabaugh, E. P., Augenstein, T. E. & Krishnan, C. (2020). Functional resistance training during walking: Mode of application differentially affects gait biomechanics and muscle activation patterns. *Gait & Posture*, *75*, 129-136.

Winter, D. A. (1991). *Biomechanics and Motor control of Human Movement. 2nd edition*. Wiley-Interscienc Publication, New York: John Wiley & Sons, Inc.

Yentes, J. M., Hunt, N., Schmid, K. K., Kaipust, J. P., McGrath, D. & Stergiou, N. (2013). The appropriate use of approximate entropy and sample entropy with short data sets. *Annals of Biomedical Engineering*, *41*(2), 349-365.