KJAB
Korean Journal of Applied Biomechanics 2024; 34(4): 185-196
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2024.34.4.185
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752
ORIGINAL

Differences in Gait Stability between Young and Middle-Aged Adults during Treadmill Walking with Rhythmic Auditory Stimulation and Time Variation

젊은 성인과 중장년층의 트레드밀 보행 시 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 보행 안정성의 차이

Soo-Ji Han[1,2], Sang-Kyoon Park[2]

[1]Industry-University Cooperation Foundation, Pukyong National University, Busan, South Korea
[2]Motion Innovation Center, Korea National Sport University, Seoul, South Korea

Received : 30 August 2024
Revised : 11 November 2024
Accepted : 12 November 2024

Corresponding Author
Sang-Kyoon Park
Motion Innovation Center, Korea National Sport University, Seoul, 05541, South Korea
Email : spark@knsu.ac.kr

Objective: The aim of this study was to compare and analyze differences in gait stability between young and middle-aged adults during treadmill walking, influenced by rhythmic auditory stimulation (RAS) and time variation.

Method: This study involved 20 young adults (age: 24.55 ± 2.09 yrs.) and 18 middle-aged adults (age: 58.35 ± 4.69 yrs.) who each performed both normal gait and RAS gait on a treadmill for 11 minutes each. Gait stability variables including spatiotemporal parameters, center of mass (COM) stability, and the ability to synchronize movement timing were calculated and analyzed. The statistical analyses were conducted using three-way repeated measures ANOVA and two-way repeated measures ANOVA.

Results: RAS gait training in middle-aged adults was found to improve spatiotemporal gait stability and symmetry. However, extending the training to 10 minutes may actually decrease gait stability. Furthermore, both age groups exhibited a decline in active braking ability due to the cognitive load imposed by treadmill-based RAS, while middle-aged adults showed greater variability in motor timing ability early in gait compared to young adults.

Conclusion: The results demonstrate that RAS gait training can improve spatiotemporal gait stability in middle-aged adults in the short term. However, after the 10-minute mark, accumulated cognitive and physical fatigue may contribute to a decline in gait stability. These findings underscore the necessity for tailored training methodologies that account for cognitive load and fatigue, particularly in middle-aged and older adults.

Keywords: Rhythmic auditory stimulation, Training time variation, Aging, Gait stability, Motor timing synchronization

INTRODUCTION

보행 시 인지기능은 신체의 안정성과 더불어 정보 처리 및 움직임을 조정하는 중요한 역할을 담당하며, 성공적인 보행에 필수적인 요소이다(Kao & Pierro, 2022; Stöckel & Mau-Moeller, 2020). 그러나, 연령이 증가함에 따라 노화로 인한 신체적 및

Copyright © 2024 Korean Journal of Applied 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.

인지적 기능이 저하되면서 보행 안정성이 감소하고, 이는 낙상으로 이어져 심각한 부상과 건강 악화를 초래할 수 있다(Hwang et al., 2023; Xu, Qu & Li, 2022). 더 나아가, 보행 동작을 수행하는 데 필요한 주의력과 시공간 능력 등의 인지기능과 운동 능력은 45세부터 선형적으로 감소한다는 연구 결과가 보고되었으며(Moustafa, 2014; Singh-Manoux et al., 2012), 이는 중년층 역시 인지 및 운동 능력 저하로 인한 부상 위험에서 자유롭지 않음을 시사한다. 이러한 이유에서 중장년층을 대상으로 보행 능력을 향상시키고 낙상을 예방하기 위한 연구들이 꾸준히 수행되어왔으며(Amiri, Dong & Frith, 2022; Qiao, 2023), 다양한 인지 훈련 방법을 적용하여 보행 능력을 개선하는 효과가 입증됨에 따라 성공적인 보행 동작을 수행하는 데 인지기능이 매우 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다(Liu, Zheng, Liu, Cao & Ding, 2023; Teraz, Šosar, Paravlić, de Bruin & Marusic, 2022; Yu et al., 2022).

보행 능력을 향상시키기 위한 인지 훈련 방법으로는 시각 및 청각 등의 감각 자극을 이용한 다양한 형태의 보행 훈련이 제시되어 왔다(Ahmed et al., 2023; Ghafoor et al., 2023; Kelly, Pool, Hamilton & Rodda, 2023; Mak, Wong & Ng, 2021; Nascimento, Boening, Rocha, do Carmo & Ada, 2024). 특히, 이 중에서도 청각 자극 방법인 메트로놈이나 일정한 속도의 박자, 리듬이 있는 선율 등과 같은 리듬청각자극(rhythmic auditory stimulation; RAS)은 뇌의 다양한 영역을 활성화시키고 운동 영역과 지각 영역의 일치를 유도함으로써 보행 능력을 향상시킬 수 있는 효과적인 훈련 방법으로 보고되고 있다(Norn, 2024; Thaut et al., 2009; Wang et al., 2024). Gonzalez-Hoelling, Reig-García, Bertran-Noguer & Suñer-Soler (2024)는 리듬청각자극이 보행 대칭성(symmetry)을 향상시키는 데 효과적이라고 보고하였으며, Minino et al. (2021)는 개인의 분속수(cadence)와 동일한 리듬청각자극 속도를 적용하는 경우 보폭이 증가되고 몸통의 흔들림을 감소시켜 안정성을 개선할 수 있다고 보고하였다. 이러한 연구 결과들은 리듬청각자극 보행 훈련을 통해 시공간 보행 패턴을 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 보행 시 나타나는 비대칭성과 신체의 균형 제어 능력 등의 보행 안정성을 향상시킴으로써 보행 시 낙상 위험을 감소시킬 수 있음을 보여준다.

그러나, 리듬청각자극 보행은 자신의 걸음을 청각 신호와 동기화하는 과정에서 주의력과 인지적 자원이 요구되기 때문에, 대상에 따라 리듬청각자극 보행 자체를 수행하는 것만으로도 인지 부하가 증가하여 이중과제로 작용할 수 있다(Leow, Watson, Prete, Waclawik & Grahn, 2021). 뿐만 아니라, 이중과제 보행이 장시간 지속되는 경우 정신적, 신체적 피로를 유발하여 보행 중 균형 능력을 저하시킬 수 있으며(Chand & Lu, 2023; Dallaway, Lucas & Ring, 2022; Kwon, Chilton, Kim & Franz, 2023), 연령이 증가할수록 인지 부하의 증가와 신체적 능력 저하로 인해 보행 안정성에 악영향을 미칠 수 있다(Pereira, & Gonçalves, 2011; Ryew, Lee & Hyun, 2019). 이처럼 리듬청각자극 보행 훈련 및 평가 시 대상의 특성에 적합한 훈련 시간을 제공하는 것은 매우 중요한 요소이며, 기존 선행연구들은 각 회당 2분에서 60분까지 다양한 수행 시간을 제공한 것으로 나타났다(Ahmed et al., 2023; Andersen, Witting & Vissing, 2022; Kitatani, Umehara, Hirono & Yamada, 2022). 그 중 트레드밀 보행 시 인지 자극이나 실시간 피드백을 제공하여 보행 능력의 개선 효과를 규명한 연구들은 1분, 2분, 5분, 8분, 10분 등 다양한 보행 수행 시간 동안의 움직임을 평가하여 진행되어온 것을 고려할 때, 효과적인 보행 훈련 시간에 대한 기준이 명확하게 제시되지 않은 것을 알 수 있다(Del Din, Godfrey, Mazza, Lord & Rochester, 2016; Khan & Fisher, 2019; Ma, Wan & Wong, 2017; Thompson, Johnston & Ross, 2021). 따라서, 보다 효율적인 보행 훈련을 통해 보행 능력 개선 효과를 극대화하기 위해 적절한 리듬청각자극 훈련 시간을 파악함으로써 연령 및 인지 능력에 따른 적합한 보행 훈련 프로토콜을 제공할 필요성이 제기된다. 본 연구에서는 젊은 성인과 중장년층의 트레드밀 보행 시 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 보행 안정성의 차이를 분석함으로써, 효과적인 보행 훈련 방법을 제시하고 낙상 예방을 위한 임상 적용 가능성을 모색하여 인지기능과 관련된 보행 능력 저하 문제를 해결하는 데 기여하고자 한다. 본 연구목적을 달성하기 위해 다음과 같이 가설을 설정하였다. 1) 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 시공간 변인은 차이가 있을 것이다. 2) 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 신체질량중심 안정성은 차이가 있을 것이다. 3) 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 보행 시 시간 변화에 따른 운동 타이밍 동기화 능력은 차이가 있을 것이다.

METHOD

1. 연구 대상

본 연구의 대상자는 최근 6개월 간 부상 경험이 없고 30분 이상 독립적인 보행이 가능한 젊은 성인 20명(young adults, YA; ages: 24.55±2.09 yrs., height: 174.53±8.03 cm, body weight: 72.84±9.67 kg), 중장년층 18명(middles age; MA; ages: 58.35±4.69 yrs., height: 169.98±4.85 cm, body weight: 72.52±7.55 kg)을 선정하였다(Liu, Yang, Tsai & Wang, 2017). 이때, 본 연구의 통계적 검증력(statistical power)을 확보하기 위해 G*power 3.1 (Franz Faul, Universität Kiel, GER) 프로그램을 사용하여 power=.85, effect size=.25 수준에서 최소 표본크기(n=38)가 필요함을 확인하였다.

또한, 모집된 대상자의 인지 능력을 파악하기 위하여 보행 실험 전 한국판 몬트리올 인지평가 척도(Korean Version of Montreal Cognitive Assessment, K-MoCA)를 사용하여 인지기능을 평가한 뒤 정상 인지기능 범주에 속한 대상자 만을 본 실험에 참여하도록 하였으며, 연구 수행을 위해 K-대학의 연구 윤리 위원회의 승인을 받은 뒤 동의서를 작성 후 실험에 참여하였다(승인번호: 20220922-078, 승인날짜: 2022.09.22.).

2. 측정도구 및 절차

먼저, 본 연구를 수행하기 위해 트레드밀(Instrumented treadmill, Bertec, USA) 주위에 적외선카메라(Qualisys3, Qualisys, SWE; sampling rate: 120 Hz) 8대를 설치하였으며, QTM software (Qualisys Track Manager, Qualisys, SWE)를 통해 자료를 수집하였다. 또한, 실험 전 보행 동작이 이루어지는 공간을 3차원 좌표화 하기 위해 NLT (non-linear transformation) 방식의 캘리브레이션을 수행하여 3차원 공간 좌표계(X축; 좌우축, Y축; 전후축, Z축; 수직축)를 설정하였다. 다음으로 연구 대상자들의 인체의 관절과 분절(몸통, 골반, 상완, 전완, 대퇴, 하퇴, 발)을 정의하기 위해 타이즈를 착용한 후 인체의 관절 및 분절에 반사 마커 40개를 부착하였다. 각 연구 대상자들은 본 실험을 수행하기 전 충분한 준비 운동(warm-up)을 실시하였으며, 자연스러운 보행 동작을 수행하기 위해 적응 시간을 충분히 가졌다. 이어서 선호하는 보행 속도를 측정하기 위해 트레드밀 위에서 사전 보행을 3분 동안 실시한 뒤 선호 속도를 파악하였으며, 이를 본 실험의 보행 속도(YA: 1.21±0.13 m/s, MA: 1.06±0.18 m/s)로 적용하였다. 실험 과정은 모든 연구 대상자들이 선호 보행 속도에 맞춰 트레드밀 위에서 일반보행(normal gait, NG; Figure 1A) 및 리듬청각자극 보행(rhythmic auditory stimulation gait, RG; Figure 1B)을 각 11분씩 수행하도록 하였으며, 보행 적응을 방지하기 위해 보행 간 휴식 시간을 10분 간 제공하였다. 또한, 리듬청각자극 보행 중 청각 신호를 제시하기 위해 메트로놈 프로그램(Interactive metronome, IM, USA)을 활용하였으며, 일반보행 중 초기 1분 동안 나타난 양 발의 분속 수(cadence) 평균 값을 리듬청각자극 보행 시 청각 신호의 속도(YA: 105.58±5.38 bpm; MA: 109±7.55 bpm)로 적용하였다. 이때, 메트로놈 청각 신호에 대한 운동 타이밍 동기화 능력(ability to synchronizing motor timing)을 파악하기 위해 In-Motion Trigger Set (Interactive Metronome, IM, USA; Figure 1C)를 사용하여 보행 중 양 발의 착지(heel contact) 시점과 메트로놈 청각 신호가 제시되는 시점 간의 시간 오차를 1/1,000 초 단위로 측정하여 자료를 수집하였다(Figure 1D). In-Motion Trigger Set는 발과 발목에 인솔 및 경량화 된 트리거 센서를 착용한 뒤 별도의 무선 송신기를 통해 무선 헤드폰으로 리듬청각자극을 제공받도록 구성되어 있으며, 보행 동작 수행 중 해당 장비 착용으로 인한 불편함이 없음을 확인하였다.

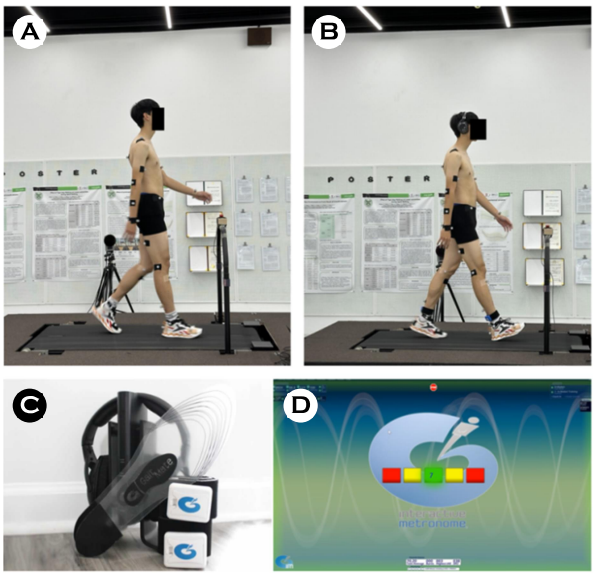

Figure 1. Normal gait (A), RAS gait (B), In-Motion trigger set (C), metronome program (D)

3. 자료 처리

실험 과정에서 수집한 11분 간의 데이터 중 보행 초기(1분~1분 30초), 중기(5분~5분 30초), 말기(10분~10분 30초) 사이의 데이터를 분석에 활용하였으며, 수집된 데이터는 Visual3D software (Has-motion, CAN)를 사용하여 분석하였다. 보행 시 양 발의 착지(heel contact)와 이지(toe off) 시점은 수직 지면반력 데이터를 통해 분석 시점(events)을 설정하였으며, 수직 지면반력 데이터의 역치(threshold)는 5 N으로 설정하였다. 이후 데이터 획득 과정에서 발생된 3차원 위치좌표 데이터의 잡음(noise)을 최소화하기 위해 2차 저역통과 필터(bi-directional butterworth 2nd low-pass filter; cut-off frequency: 6 Hz)를 양방향으로 적용하여 필터링을 수행하였다.

4. 분석 변인

1) 시공간 변인(spatio-temporal parameters)

일반보행 및 리듬청각자극 보행 시 시간 변화에 따른 시공간 변인은 우세측 하지의 분속 수와 걸음 시간(step time), 보폭(step length)의 평균과 표준편차를 산출한 뒤 분석에 사용하였다.

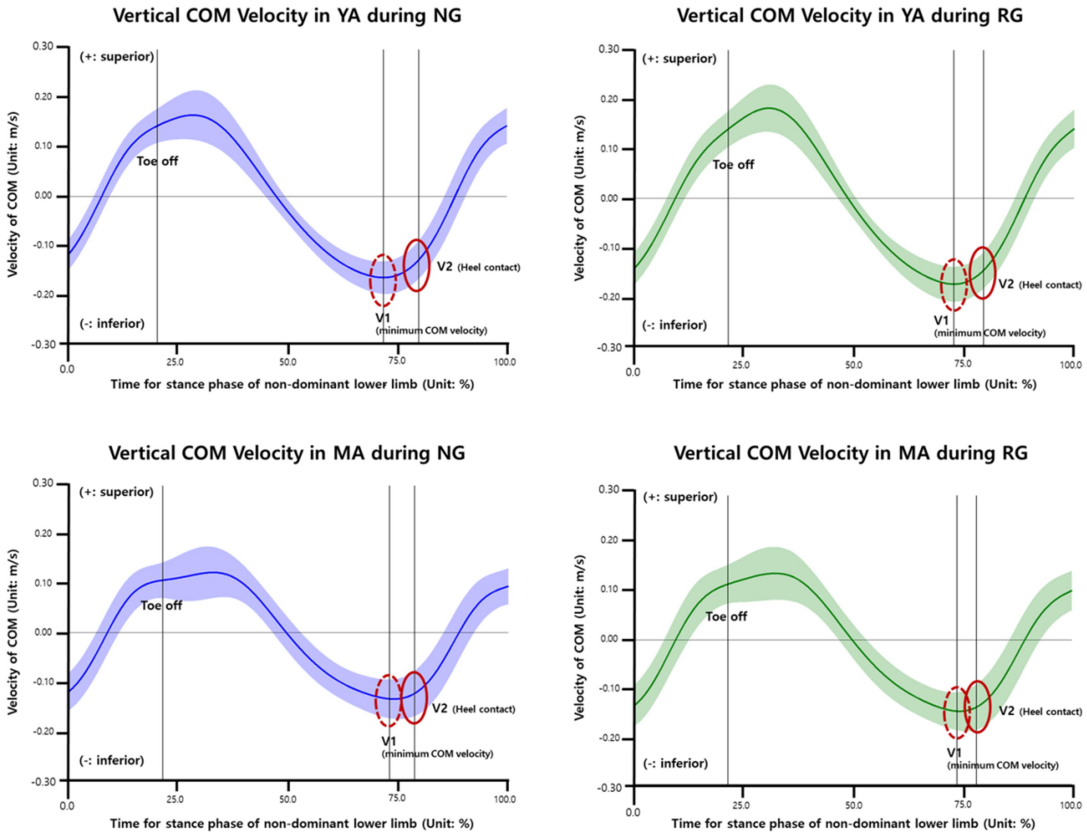

Figure 2. Vertical COM speed as a function of training time by gait type in young and middle-aged adults, YA: young adults, MA: middle-aged adults, NG: normal gait, RG: rhytmic auditory stimulation gait

2) 신체질량중심 안정성(COM stability)

일반보행 및 리듬청각자극 보행 시 시간 변화에 따른 신체질량중심(center of mass, COM)의 안정성을 평가하기 위해, 먼저 COM의 좌우 이동 변위(medio-lateral displacement)에 대한 비대칭 지수(asymmetry index, AI)를 산출하였다(Byun, Han, Bhang, Seo & Lee, 2020). 이때, COM_d는 신체질량중심의 좌우 변위를 의미하며, RS는 오른발 흔듦기(swing phase of right foot), LS는 왼발 흔듦기(swing phase of left foot)를 의미한다.

$$Asymmetry\ Index\ (\%\ AI) = \left| \frac{average\ of\ COM_d\ (RS) - average\ of\ COM_d(LS)}{average\ of\ COM_d\ (RS)} \right| \times 100$$

또한, 지면 착지 시 신체의 능동적 제동(active braking) 능력을 분석하기 위해 COM의 수직 속도를 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Braking\ Index\ (\%\ BI) = \frac{(V1 - V2)}{V1} * 100$$

이때, V1은 지면 접촉(heel contact) 전 COM 속도의 최소값이며, V2은 지면 착지(heel contact) 시점의 COM 속도를 의미한다(Figure 2).

위 식을 통해 계산된 BI의 값이 클수록 부드러운 착지를 수행하기 위해 지면 착지 전 COM의 수직 속도를 감속시켜 발의 지면 접촉을 준비하는 능동적인 제동을 의미하며, 값이 작을수록 지면 착지 전 COM의 수직 속도가 감속하지 않는 수동적 제동을 의미한다(Langeard et al., 2021).

3) 운동 타이밍 동기화 능력(ability to synchronizing motor timing)

운동 타이밍 변인은 리듬청각자극 보행 시 트리거를 통해 수집된 양 발의 착지(heel contact) 시점과 메트로놈 신호 사이의 시간적 오차에 대한 절대 값을 구한 뒤 평균 값을 사용하였다. 또한, 운동 타이밍에 대한 변동성은 평균과 표준편차

값을 사용하여 다음과 같이 변동계수(coefficient of variation)를 산출한 뒤 분석에 사용하였다.

$$Coefficient\ of\ Variation\ (\%\ CV) = \frac{Standard\ deviation}{Mean} * 100$$

5. 통계 처리

본 연구의 통계 처리는 SPSS 25.0 (IBM, USA) 프로그램을 사용하여 분석하였으며, 연령 집단(젊은 성인 및 중장년층)과 보행 유형(일반보행 및 리듬청각자극 보행) 및 시간 변화(1분,

Table 1. Result of spatiotemporal parameter

Variables	Age	Gait type	Time *M* (*SD*) 1 min.	5 min.	10 min.	Source	*F* (*p*)
Cadence (Unit: step/min)	YA	NG	105.70 (5.47)	104.89 (5.46)	106.18 (5.81)	**Main effects**	
						Age	1.257 (.28)
						Time	0.135 (.84)
		RG	106.60 (6.10)	107.01 (5.97)	106.66 (5.83)	Gait Type	**5.777 (.03)***
						Interaction effects	
	MA	NG	108.60 (6.91)	108.75‡ (7.43)	107.14† (8.05)	Age × Time	0.366 (.66)
						Age × Gait Type	0.102 (.76)
		RG	108.41‡ (7.08)	108.73‡ (7.52)	110.03#† (7.32)	Time × Gait Type	1.849 (.17)
						Age × Time × Gait Type	**5.926 (.01)***
Step time (Unit: ms)	YA	NG	569.49 (30.53)	573.86 (29.82)	567.02 (31.01)	**Main effects**	
						Age	0.854 (.37)
						Time	0.075 (.90)
		RG	564.91 (32.27)	562.63 (31.49)	564.49 (30.96)	Gait Type	**6.169 (.02)***
						Interaction effects	
	MA	NG	555.52 (36.87)	554.58‡ (38.35)	569.20† (49.44)	Age × Time	1.261 (.29)
						Age × Gait Type	0.016 (.91)
		RG	556.20‡ (37.75)	554.80‡ (39.27)	548.01#† (37.71)	Time × Gait Type	2.240 (.13)
						Age × Time × Gait Type	**5.611 (.02)***
Step length (Unit: % leg length)	YA	NG	75.45 (7.06)	75.95 (6.92)	75.27 (7.59)	**Main effects**	
						Age	**6.136 (.02)***
						Time	1.152 (.31)
		RG	74.99 (7.85)	74.74 (7.83)	75.25 (7.96)	Gait Type	3.865 (.06)
						Interaction effects	
	MA	NG	67.36 (10.88)	67.15‡ (10.50)	68.95† (9.65)	Age × Time	1.334 (.27)
						Age × Gait Type	0.000 (.99)
		RG	67.22 (10.32)	67.26 (10.79)	67.26 (11.62)	Time × Gait Type	0.566 (.54)
						Age × Time × Gait Type	**4.245 (.03)***

Note. *Significant difference at p<.05, Significant difference in post hoc test results at #: 1 min., †: 5 min., ‡: 10 min
YA: young adults, MA: middle-ages, NG: normal gait, RG: rhythmic auditory stimulation gait

5분, 10분)에 따른 보행 안정성의 차이를 분석하기 위해 삼원 반복측정 분산분석(3-way ANOVA with repeated measure)을 실시하였다. 또한, 연령 집단별 리듬청각자극 보행 시간 변화에 따른 운동 타이밍 동기화 능력의 차이를 분석하기 위해 이원 반복측정 분산분석(2-way ANOVA with repeated measure)을 실시하였다. 이후, 분석결 과에서 통계적으로 유의한 차이가 나타난 변인에 대한 집단 간 및 집단 내 차이를 분석하기 위해 *LSD* 사후검정(*post-hoc*)을 실시하였으며, 모든 변인에 대한 통계적 유의수준은 α=.05로 설정하였다.

RESULTS

1. 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 시공간 변인의 차이

시공간 변인의 분석 결과는 <Table 1>과 같다. 먼저, 분속수는 보행 유형에 따른 주효과 및 연령 × 시간 × 보행유형에 따른 상호작용 효과에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 연령 × 시간 × 보행유형에 따른 사후검정 결과 중장년층의 분속 수는 일반보행 5분과 10분 간에 차이가 있는 것으로 나타났으며, 리듬청각자극 보행 1분 및 5분과 10분 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 걸음 시간의 경우, 보행 유형에 따른 주효과 및 연령 × 시간 × 보행유형에 따른 상호작용 효과에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 연령 × 시간 × 보행유형에 따른 사후검정 결과 중장년층의 걸음 시간은 일반보행 5분과 10분 간에 차이가 있는 것으로 나타났으며, 리듬청각자극 보행은 1분 및 5분과 10분 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 보폭의 경우, 연령에 따른 주효과 및 연령 × 시간 × 보행유형에 따른 상호작용 효과에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 또한, 연령 × 시간 × 보행유형에 따른 사후검정 결과, 보폭은 중장년층의 일반

Table 2. Result of gait stability

Variables	Age	Gait type	Time *M* (*SD*) 1 min.	5 min.	10 min.	Source	*F* (*p*)
Asymmetry index of COM ML displacement (Unit: %)	YA	NG	24.38 (3.84)	24.70 (3.62)	24.01 (3.48)	**Main effects**	
						Age	0.065 (.81)
						Time	2.928 (.07)
		RG	24.79‡ (3.45)	23.57 (3.88)	22.90# (3.39)	Gait Type	0.679 (.42)
						Interaction effects	
	MA	NG	24.04 (3.86)	23.60 (4.82)	22.64 (5.48)	Age × Time	**3.322 (.05)***
						Age × Gait Type	0.363 (.56)
		RG	24.02† (4.60)	22.66# (5.01)	24.31 (6.11)	Time × Gait Type	1.826 (.18)
						Age × Time × Gait Type	1.513 (.24)
Braking index (Unit: %)	YA	NG	22.67‡ (8.86)	22.77‡ (9.14)	19.74#† (8.76)	**Main effects**	
						Age	3.423 (.08)
						Time	1.489 (.24)
		RG	15.04 (8.36)	16.33 (7.42)	16.18 (8.02)	Gait Type	**5.127 (.01)***
						Interaction effects	
	MA	NG	17.19‡ (11.86)	15.28‡ (10.64)	14.29#† (9.94)	Age × Time	0.692 (.47)
						Age × Gait Type	0.668 (.43)
		RG	10.81 (9.19)	10.89 (9.43)	11.06 (10.36)	Time × Gait Type	**4.888 (.02)***
						Age × Time × Gait Type	0.277 (.75)

Note. *Significant difference at p<.05, Significant difference in post hoc test results at #: 1 min., †: 5 min., ‡: 10 min
ML: medio-lateral, YA: young adults, MA: middle-ages, NG: normal gait, RG: rhythmic auditory stimulation gait

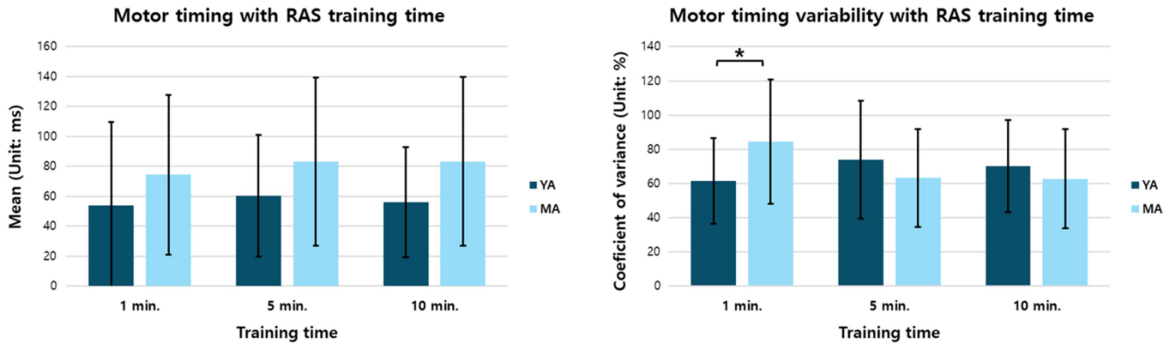

Figure 3. *Significant difference at p<.05, YA: young adults, MA: middle-aged adults.

보행 5분과 10분 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05).

2. 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 신체질량중심 안정성의 차이

보행 안정성을 분석한 결과는 <Table 2>와 같다. 신체질량중심의 좌우 이동 변위에 대한 비대칭성은 연령 × 시간에 따른 상호작용 효과에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 또한, 연령 × 시간에 따른 사후검정 결과 젊은 성인의 신체질량중심 좌우 이동 변위 비대칭성은 보행 1분과 10분 간에 차이가 있는 것으로 나타났으며, 중장년층은 보행 1분과 5분 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 신체질량중심의 능동적 제동 능력은 보행 유형에 따른 주효과 및 시간 × 보행유형에 따른 상호작용 효과에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 시간 × 보행유형에 따른 사후검정 결과에서는 일반보행의 1분 및 5분과 10분 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05).

3. 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 보행 시간 변화에 따른 운동 타이밍 동기화 능력의 차이

리듬청각자극 보행 시 운동 타이밍 및 변동성의 결과는 <Figure 3>과 같다. 먼저, 운동 타이밍은 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않은 반면, 운동 타이밍에 대한 변동성은 연령 × 시간에 따른 상호작용 효과에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05). 연령 × 시간에 따른 사후검정 결과는 1분 경과 시점에서 젊은 성인과 중장년층 간에 운동 타이밍 변동성의 차이가 있는 것으로 나타났다(p<.05).

DISCUSSION

본 연구는 트레드밀 보행 시 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 젊은 성인과 중장년층의 보행 안정성에 대한 차이를 규명하기 위해 젊은 성인과 중장년층의 일반보행 및 리듬청각자극 보행 시 1분 경과, 5분 경과, 10분 경과 시의 시공간 변인과 신체질량중심 안정성, 운동 타이밍 동기화 능력의 차이를 분석하였다.

1. 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 시공간 변인의 차이

리듬청각자극 보행은 일반보행에 비해 걸음 시간이 감소하고 분속 수가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 리듬청각자극 보행 시 제공되는 리드미컬한 신호가 분속 수의 증가와 걸음 시간을 감소시켜 동적인 패턴의 보행 안정성을 향상시킬 수 있다고 보고한 선행연구 결과와 일치한다(Calabrò et al., 2019; Kitatani et al., 2022). 또한, 보폭은 젊은 성인에 비해 중장년층이 더 짧게 나타났으며, 이러한 결과는 연령이 증가함에 따라 하지근력 감소 및 신경계 변화로 인해 안정성이 낮은 보행 패턴을 나타내는 것을 의미한다(Vandervoort, 2002). 시공간 변인의 상호작용 효과를 세부적으로 살펴봤을 때 젊은 성인은 보행 유형과 보행 시간에 따라 차이가 나타나지 않은 반면, 중장년층은 상반된 결과가 나타났다. Han, Bae & Yoon (2022)은 젊은 성인의 보행이 정상 보행 패턴에 가깝기 때문에 리듬청각자극 제공이 시공간 보행변수를 변화시키지 않을 수 있다고 보고하였으며, 본 연구의 결과에서도 마찬가지로 젊은 성인의 시공간 보행 패턴이 정상 보행 패턴에 가깝기 때문에 차이가 나타나지 않은 것으로 사료된다. 반면 중장년층의 일반보행은 10분 경과 시에 분속 수가 감소함에 따라 걸음 시간과 보폭이 증가하는 패턴을 보였다. Pereira & Gonçalves (2011)는 보행 중 피로가 발생할 경우 안전한 움직임 패턴을 유지하기 위해 보폭을 늘리고 보행 속도를 감속함으로써 자연스러운 조정 전략을 나타낸다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 고정된 속도의 트레드밀에서 보행을 수

행했기 때문에 보행 속도를 감속할 수 없으므로, 안정적인 보행 동작 수행을 위해 보폭과 시간을 조절하는 전략을 나타낸 것으로 보인다. 다시 말해, 중장년층의 일반보행 10분 경과 시점에 나타난 분속 수의 감소와 걸음 시간 및 보폭의 증가는 보행 동작의 반복 수행으로 인한 피로가 누적되어 안정성이 저하되었기 때문에 균형을 유지하려는 전략을 채택한 것으로 판단된다. 한편, 중장년층의 리듬청각자극 보행은 일반보행과 상이한 결과가 나타났으며, 10분 경과 시에 분속 수가 증가함에 따라 걸음 시간이 감소하였지만 보폭에는 차이가 없었다. 이러한 결과는 이동성이 제한된 상황에서 리드미컬한 신호에 보행 패턴을 맞추기 위해 보폭을 조절하기보다 걸음 시간을 줄여 보행의 빠른 리듬감을 유지하려는 효율적인 전략을 나타낸다(Baudendistel et al., 2021). 이 과정에서 인체는 편안한 보행 패턴에서의 동작과 유사한 움직임을 달성하기 위해 더 많은 근력을 사용하게 되며, 분속 수가 높을 수록 보행 중 전방 이동을 수행하는 팔다리에 의존하여 동작을 수행하게 된다(Kuo, Hong, Li & Lu, 2015). 또한, 시간이 지속될수록 반복적인 보행 동작 수행으로 인해 하지관절에 가해지는 부하를 증가시키며, 이로 인해 신체적 피로와 낙상 가능성을 유발하고 보행 안정성을 저하시킬 수 있다(Barbieri et al., 2013; Inai, Takabayashi, Edama & Kubo, 2021). 뿐만 아니라 Plotnik, Dagan, Gurevich, Giladi & Hausdorff (2011)의 연구에서 보고된 바와 같이 장시간 리듬청각자극 보행이 지속적인 인지활동과 정신적 피로를 유발하여 보행 능력 저하에 영향을 미친다는 점을 고려하였을 때, 인지기능이 상대적으로 저하된 중장년층이 리듬청각자극 보행을 10분 동안 수행하는 경우 지속적인 인지활동과 보행 동작의 반복 수행으로 인해 신체적·정신적 피로가 발생하고 낙상 위험을 유발하는 것으로 사료된다.

2. 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 신체질량중심 안정성의 차이

신체질량중심의 좌우 비대칭성은 연령과 보행 시간에 따라 상호작용 효과가 나타났으며, 젊은 성인의 일반보행은 시간에 따라 비슷한 값을 나타내는 데 비해 리듬청각자극 보행은 1분 경과 시보다 10분 경과 시에 신체질량중심의 비대칭성이 감소하는 것으로 나타났다. 젊은 성인에게 리듬청각자극을 5분간 제공한 Han et al. (2022)의 연구에서도 일반보행 대비 리듬청각자극 보행을 수행하였을 때 신체질량중심의 좌우 변위가 감소하고 보행 대칭성이 개선되어 본 연구와 일치하는 결과를 나타냈다. 한편, 중장년층의 경우 일반보행 시의 1분과 5분 경과 시의 차이에 비해 리듬청각자극 보행의 1분과 5분 경과 시의 비대칭성 감소량이 더 크게 나타났다. 즉, 중장년층이 리듬청각자극 보행은 젊은 성인보다 신체질량중심의 좌우 비대칭성이 개선되는 효과가 더 빨리 나타났음을 알 수 있다. 그러나, 리듬청각자극 보행 10분 경과 시 신체질량중심의 비대칭성 평균 값을 보면 1분 경과 시보다 높은 수치를 나타내었지만 이에 따른 통계적 차이는 나타나지 않았다. 이러한 결과는 10분 경과 시의 평균 값이 더 높은 값을 나타냄에도 불구하고 큰 표준편차로 인한 결과로 사료된다. Tesio & Rota (2019)와 Ochoa-Diaz & Bó (2020)의 연구에 따르면 신체질량중심의 좌우 비대칭성 증가는 한쪽으로 편향된 신체의 균형을 유지하려고 하기 때문에 불필요한 에너지 소모가 증가할 수 있으며, 장기적으로는 피로가 누적될 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서 나타난 경향은 중장년층에게 리듬청각자극을 제공할 때 단기적으로는 비대칭성을 감소시키는 긍정적인 효과가 나타날 수 있으나, 10분 간 리듬청각자극 보행을 지속할 경우 피로를 유발하고 체간 안정성을 저하시킬 가능성이 있음을 시사한다. 그러나 앞서 말했듯이 중장년층의 10분 경과 시의 결과는 통계적인 차이가 나타나지 않았으며, 평균 값의 경향으로만 추정하였기 때문에 더 많은 중장년층을 대상으로 추가적인 분석을 수행하여 보다 명확한 결과를 제시할 필요가 있을 것이다.

한편, 신체질량중심의 능동적 제동 지수는 두 연령 집단 모두에게 리듬청각자극을 제공하였을 때 더 낮게 나타났다. 신체질량중심의 능동적 제동은 흔듦기 동안 발이 지면에 접촉하는 과정에서, 중추신경계(central nervous system)의 제어를 통해 신체질량중심의 수직 속도를 감소시켜 부드러운 착지를 가능하게 하는 능력으로 값이 클수록 능동적 제동 능력이 우수한 것을 의미한다(Simonet, Delafontaine, Fourcade & Yiou, 2024; Welter et al., 2007). Bayot et al. (2018)에 따르면 인지기능이 손상된 경우 단일 지지기(single supports phase) 동안의 균형 제어 능력이 감소하여 착지 시 제동 능력이 저하된다고 보고되었으며, Lacour, Bernard-Demanze & Dumitrescu (2008)는 이중과제 보행에서 비교적 쉬운 과제를 수행할 경우 신체의 균형이 개선되지만, 과제의 인지적 요구가 증가하면 균형 제어 능력이 감소한다고 보고하였다. 이처럼 본 연구에서도 능동적으로 보행 속도 조절이 불가능한 고정 속도의 트레드밀 리드미컬한 신호에 맞춰 발을 착지해야 하는 인지적 요구가 있는 과제를 동시에 행함에 따라, 두 연령층 모두 일반보행 시보다 능동적인 균형 제어 능력이 손상된 것으로 사료된다. 또한, 시간과 보행 유형의 상호작용 효과에서는 일반보행의 1분과 5분 경과 시보다 10분 경과 시에 능동적 제동 지수가 상대적으로 낮게 나타났으며, 그에 비해 리듬청각자극 보행은 일반보행의 모든 시간보다 낮은 값을 지속적으로 유지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과도 마찬가지로, 리듬청각자극 보행이 인지적 요구를 상대적으로 더 필요로 하기 때문에 균형 제어 능력이 감소하여 나타난 결과로 판단된다(Bayot et al., 2018). 더불어 일반보행은 상대적으로 5분

경과 시점까지 매 스텝(step)마다 능동적으로 제동을 수행하는 것으로 보이며, 10분 경과 시점에서 제동 능력이 감소하였으며, 이는 앞서 논의한 시공간 변인과 같이 보행이 지속됨에 따라 피로가 발생하여 나타난 결과로 사료된다(Pereira & Gonçalves, 2011). Santos et al. (2016)은 피로를 유발한 경우 신체활동수준과 관계없이 수직 제동 충격량이 감소하게 되며, 지면 착지 시 제동력이 충분히 발휘되지 않아 균형 능력과 안정성이 저하될 수 있다고 보고하였다. 따라서, 두 연령 집단 모두 트레드밀 일반보행을 10분가량 수행하는 경우 신체의 피로를 유발하여 능동적인 제동 능력이 저하되는 것으로 판단된다.

3. 젊은 성인과 중장년층의 리듬청각자극 보행 시간 변화에 따른 운동 타이밍 동기화 능력의 차이

리듬청각자극 보행 시 운동 타이밍에 대한 동기화 능력에서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 중장년층의 운동 타이밍 동기화 능력이 젊은 성인보다 낮은 경향이 관찰되었다. Rose et al. (2021)의 연구에서 젊은 성인이 노인에 비해 운동 타이밍 성능이 우수하게 나타난 결과를 보았을 때, 본 연구도 마찬가지로 신체적·인지적 능력이 저하된 중장년층이 낮은 운동 타이밍을 나타낼 가능성이 있다고 사료된다. 또한, 운동 타이밍에 대한 변동성의 경우 리듬청각자극 보행 1분 경과 시에 중장년층이 젊은 성인보다 높은 변동성을 나타냈다. 이는 리듬청각자극 보행이 인지 부하를 초래하기 때문에, 인지기능이 보다 저하된 중장년층의 변동성이 크게 나타난 것으로 판단된다(LaRoche, Greenleaf, Croce & McGaughy, 2014). 반면 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 5분 경과 시점부터 중장년층의 타이밍 변동성은 젊은 성인보다 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 이유는 연령이 증가할수록 운동 타이밍의 속도는 느려지지만 반응의 정확도는 높아진다는 선행연구 결과를 보았을 때(Endrass, Schreiber & Kathmann, 2012), 보행 시작 1분 경과 시 트레드밀 리듬청각자극 보행에 적응하는 과정을 거친 후, 5분 경과 시점에 접어들면서 운동 타이밍의 속도를 다소 희생하더라도 일관성을 확보함으로써 보행 시간의 정확성을 유지하려는 전략을 수행할 가능성이 있을 것으로 사료된다.

CONCLUSION

본 연구는 젊은 성인과 중장년층의 트레드밀 보행 시 리듬청각자극 적용 및 시간 변화에 따른 보행 안정성의 차이를 분석함으로써, 지속적인 인지 부하에 따른 보행 안정성의 변화를 파악하고 이를 바탕으로 효과적인 보행 훈련 방법을 제시하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 중장년층은 리듬청각자극 보행을 통해 시공간적 보행 안정성을 향상시킬 수 있지만, 10분 동안 수행할 경우 지속적인 인지 활동과 반복적인 보행 동작 수행으로 인한 신체적·정신적 피로를 유발하여 보행 안정성을 저하시킬 수 있는 것으로 나타났다. 둘째, 리듬청각자극 제공이 두 연령 집단 모두에게 신체질량중심의 좌우 비대칭성을 개선하는 효과가 있지만, 능동적 제동 능력을 저하시키는 것으로 나타났다. 셋째, 중장년층은 리듬청각자극 보행 초기에 젊은 성인보다 운동 타이밍 동기화 능력의 변동성이 크게 나타났다. 종합적으로, 리듬청각자극 보행은 중장년층에게 시공간적 보행 안정성과 신체질량중심의 좌우 대칭성 개선에 단기적인 효과가 있을 수 있으나 능동적 제동 능력을 저하시키며, 특히 10분 동안 훈련을 수행할 경우 지속적인 인지 및 신체활동으로 인해 피로가 누적되어 보행 안정성을 저하시키고 낙상 위험을 증가시킬 수 있다. 따라서, 중장년층에게 리듬청각자극 보행을 적용할 경우 인지 및 신체적 부담을 고려한 맞춤형 접근이 필요하며, 훈련 초기에는 보행 패턴의 높은 변동성을 유의하여 훈련 시간을 점진적으로 조절하는 전략이 요구된다.

본 연구를 통해 중장년층의 보행 안정성을 향상시키고 낙상 위험을 줄이기 위한 효과적인 보행 훈련 방법을 계획하는 데 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 본 연구는 인지기능이 저하된 환자나 노인 등을 대상으로 선정하지 않았고, 개개인의 보행 및 인지특성에 맞춘 자극을 제시하지 못하였기 때문에 결과를 일반화하는 데 한계가 있다. 또한, 고정된 트레드밀 속도가 연구 결과에 영향을 미쳤을 가능성을 배제할 수 없으며, 훈련을 10분 이상 지속 시에 나타나는 보행 안정성 변화를 예측하는 데 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 개인의 다양한 특성과 인지기능 상태를 고려한 장기적인 훈련 효과를 검증함으로써, 인지 저하 환자를 위한 체계적인 맞춤형 훈련 프로토콜 개발을 위한 후속 연구의 필요성이 제기된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2022S1A5A2A01045782).

REFERENCES

Ahmed, G. M., Fahmy, E. M., Ibrahim, M. F., Nassief, A. A., Elshebawy, H., Mahfouz, M. M. & Elzanaty, M. Y. (2023). Efficacy of rhythmic auditory stimulation on gait parameters in hemiplegic stroke patients: A randomized controlled trial. *The Egyptian Journal of Neurology, Psychiatry*

and Neurosurgery, *59*(1), 8.

Amiri, A., Dong, X. & Frith, K. (2022). Risk of falls in adults 45~64 years old in the United States. *Public Health Nursing*, *39*(6), 1235-1245.

Andersen, L. K., Witting, N. & Vissing, J. (2022). Effects of rhythmic auditory stimulation on walking during the 6-minute walk test in patients with generalised Myasthenia Gravis. *European Journal of Physiotherapy*, *24*(6), 333-338.

Barbieri, F. A., Dos Santos, P. C. R., Lirani-Silva, E., Vitório, R., Gobbi, L. T. B. & Van Diëen, J. H. (2013). Systematic review of the effects of fatigue on spatiotemporal gait parameters. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, *26*(2), 125-131.

Baudendistel, S. T., Schmitt, A. C., Stone, A. E., Raffegeau, T. E., Roper, J. A. & Hass, C. J. (2021). Faster or longer steps: Maintaining fast walking in older adults at risk for mobility disability. *Gait & Posture*, *89*, 86-91.

Bayot, M., Dujardin, K., Tard, C., Defebvre, L., Bonnet, C. T., Allart, E. & Delval, A. (2018). The interaction between cognition and motor control: A theoretical framework for dual-task interference effects on posture, gait initiation, gait and turning. *Neurophysiologie Clinique*, *48*(6), 361-375.

Byun, K., Han, S., Bhang, D., Seo, H. & Lee, H. K. (2020). Effects of real-time visual feedback gait training on gait stability in older adults. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *30*(3), 247-253.

Calabrò, R. S., Naro, A., Filoni, S., Pullia, M., Billeri, L., Tomasello, P., Portaro, S., Lorenzo, G. D., Tomaino, C. & Bramanti, P. (2019). Walking to your right music: a randomized controlled trial on the novel use of treadmill plus music in Parkinson's disease. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *16*, 1-14.

Chand, S. & Lu, Y. (2023). Dual task scheduling strategy for personalized multi-objective optimization of cycle time and fatigue in human-robot collaboration. *Manufacturing Letters*, *35*, 88-95.

Dallaway, N., Lucas, S. J. & Ring, C. (2022). Cognitive tasks elicit mental fatigue and impair subsequent physical task endurance: Effects of task duration and type. *Psychophysiology*, *59*(12), e14126.

Del Din, S., Godfrey, A., Mazza, C., Lord, S. & Rochester, L. (2016). Feasibility of a home-based smartphone-delivered automated feedback training for gait in people with Parkinson's disease. *Gait & Posture*, *50*, 159-164.

Endrass, T., Schreiber, M. & Kathmann, N. (2012). Speeding up older adults: Age-effects on error processing in speed and accuracy conditions. *Biological Psychology*, *89*(2), 426-432.

Ghafoor, F., Fatima, K., Fawad, M., Munawar, A., Baig, M. J. & Ahmad, Z. (2023). Effectiveness of treadmill training alone versus treadmill training with external clues on improving gait and functional ability in Parkinson's patient: Improving gait and functional ability in Parkinson's patient. *Pakistan Journal of Health Sciences*, 105-110.

Gonzalez-Hoelling, S., Reig-García, G., Bertran-Noguer, C. & Suñer-Soler, R. (2024). The effects of rhythmic auditory stimulation on functional ambulation after stroke: A systematic review. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, *24*(1), 45.

Han, S., Bae, G. & Yoon, S. (2022). Evaluation of treadmill gait stability in young adults applying rhythmic auditory stimulation. *Sports Science*, *40*(1), 249-257.

Hwang, P. W., Auais, M., Vafaei, A., Rosendaal, N. T., Wu, Y. Y. & Pirkle, C. M. (2023). Disentangling the relationship between falls, fear of falling, physical function and walking by applying a socioecological framework to the International Mobility in Aging Study. *South Eastern European Journal of Public Health*, 1-21.

Inai, T., Takabayashi, T., Edama, M. & Kubo, M. (2021). Effects of step length and cadence on hip moment impulse in the frontal plane during the stance phase. *PeerJ*, *9*, e11870.

Kao, P. C. & Pierro, M. A. (2022). Motor adaptation to cognitive challenges and walking perturbations in healthy young adults. *Gait & Posture*, *92*, 167-175.

Kelly, G., Pool, J., Hamilton, C. & Rodda, J. (2023). Rhythmic auditory stimulation to improve gait rehabilitation outcomes for children with acquired brain injury: A pilot study. *International Journal of Therapy and Rehabilitation*, *30*(3), 1-13.

Khan, S. & Fisher, B. (2019). Real-time feedback training to improve gait and posture in Parkinson's disease. *Pro Quest Dissertations & Theses Global*, 1-135.

Kitatani, R., Umehara, J., Hirono, T. & Yamada, S. (2022). Rhythmic auditory stimulation during gait adaptation enhances learning aftereffects and savings by reducing common neural drives to lower limb muscles. *Journal of Neurophysiology*, *128*(5), 1324-1336.

Kuo, C. C., Hong, S. W., Li, J. D. & Lu, T. W. (2015). Influence of step length and cadence on the sharing of the total support moments between the lower limbs during level

walking. *Proceedings of the 33rd International Conference on Biomechanics in Sports: Coaching and Sports Activities* (pp. 1046-1049). Poitiers, France: International Society of Biomechanics in Sports.

Kwon, Y., Chilton, L. K., Kim, H. & Franz, J. R. (2023). The effect of prolonged walking on leg muscle activity patterns and vulnerability to perturbations. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *73*, 102836.

Lacour, M., Bernard-Demanze, L. & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, *38*(6), 411-421.

Langeard, A., Mathon, C., Ould-Slimane, M., Decker, L., Bessot, N., Gauthier, A. & Chastan, N. (2021). Kinematics or kinetics: Optimum measurement of the vertical variations of the center of mass during gait initiation. *Sensors*, *21*(23), 7954.

LaRoche, D. P., Greenleaf, B. L., Croce, R. V. & McGaughy, J. A. (2014). Interaction of age, cognitive function, and gait performance in 50-80-year-olds. *Age*, *36*, 1-12.

Leow, L. A., Watson, S., Prete, D., Waclawik, K. & Grahn, J. A. (2021). How groove in music affects gait. *Experimental Brain Research*, *239*(8), 2419-2433.

Liu, Y. C., Yang, Y. R., Tsai, Y. A. & Wang, R. Y. (2017). Cognitive and motor dual task gait training improve dual task gait performance after stroke-A randomized controlled pilot trial. *Scientific Reports*, *7*(1), 4070.

Liu, Y., Zheng, M., Liu, J., Cao, C. & Ding, Y. (2023). Effects of cognitive training in flanker task on mobility of older adults: A randomized controlled trail. *Gerontology*, *69*(5), 593-602.

Ma, C. Z., Wan, A. H. & Wong, D. W. (2017). Configurable, wearable sensing and vibrotactile feedback system for gait training. *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, *14*(1), 1-11.

Mak, T. C., Wong, T. W. & Ng, S. S. (2021). Visual-related training to improve balance and walking ability in older adults: A systematic review. *Experimental Gerontology*, *156*, 111612.

Minino, R., Troisi Lopez, E., Sorrentino, P., Rucco, R., Lardone, A., Pesoli, M., Tafuri, D., Mandolesi, L., Sorrentino, G. & Liparoti, M. (2021). The effects of different frequencies of rhythmic acoustic stimulation on gait stability in healthy elderly individuals: A pilot study. *Scientific Reports*, *11*(1), 19530.

Moustafa, A. A. (2014). Motor and cognitive changes in normal aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*, 331.

Nascimento, L. R., Boening, A., Rocha, R. J., do Carmo, W. A. & Ada, L. (2024). Walking training with auditory cueing improves walking speed more than walking training alone in ambulatory people with Parkinson's disease: A systematic review. *Journal of Physiotherapy*, *70*(3), 208-215.

Norn, K. (2024). The effect of rhythmic auditory stimulation on gait in adults with multiple sclerosis: A literature review. *Undergraduate Research in Natural and Clinical Science and Technology Journal*, *8*, 1-8.

Ochoa-Diaz, C. & Bó, A. P. L. (2020). Symmetry analysis of amputee gait based on body center of mass trajectory and discrete Fourier transform. *Sensors*, *20*(8), 2392.

Pereira, M. & Gonçalves, M. (2011). Effects of fatigue induced by prolonged gait when walking on the elderly. *Human Movement*, *12*(3), 242-247.

Plotnik, M., Dagan, Y., Gurevich, T., Giladi, N. & Hausdorff, J. M. (2011). Effects of cognitive function on gait and dual tasking abilities in patients with Parkinson's disease suffering from motor response fluctuations. *Experimental Brain Research*, *208*, 169-179.

Qiao, Y. (2023, March). The effect of depressive symptoms on falls of middle-aged and elderly people based on the PSM method. In *Second International Conference on Biological Engineering and Medical Science (ICBioMed 2022)* (Vol. 12611, pp. 812-818). SPIE.

Rose, D., Ott, L., Guérin, S. M., Annett, L. E., Lovatt, P. & Delevoye-Turrell, Y. N. (2021). A general procedure to measure the pacing of body movements timed to music and metronome in younger and older adults. *Scientific Reports*, *11*(1), 3264.

Ryew, C. C., Lee, A. R. & Hyun, S. H. (2019). The relationship between ground reaction force components and peak power according to induced fatigue during 16-km walking. *Journal of Exercise Rehabilitation*, *15*(5), 731.

Santos, P. C. R., Gobbi, L. T. B., Orcioli-Silva, D., Simieli, L., van Dieën, J. H. & Barbieri, F. A. (2016). Effects of leg muscle fatigue on gait in patients with Parkinson's disease and controls with high and low levels of daily physical activity. *Gait & Posture*, *47*, 86-91.

Simonet, A., Delafontaine, A., Fourcade, P. & Yiou, E. (2024). Vertical center-of-mass braking and motor performance during gait initiation in young healthy adults, elderly healthy adults, and patients with Parkinson's disease: A comparison of force-plate and markerless motion capture

systems. *Sensors*, *24*(4), 1302.

Singh-Manoux, A., Kivimaki, M., Glymour, M. M., Elbaz, A., Berr, C., Ebmeier, K. P., Ferrie, J. E. & Dugravot, A. (2012). Timing of onset of cognitive decline: Results from Whitehall II prospective cohort study. *BMJ*, 344.

Stöckel, T. & Mau-Moeller, A. (2020). Cognitive control processes associated with successful gait performance in dual-task walking in healthy young adults. *Psychological Research*, *84*(6), 1766-1776.

Teraz, K., Šosar, L., Paravlić, A. H., de Bruin, E. D. & Marusic, U. (2022). Impact of motor-cognitive interventions on selected gait and balance outcomes in older adults: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers in Psychology*, *13*, 837710.

Tesio, L. & Rota, V. (2019). The motion of body center of mass during walking: A review oriented to clinical applications. *Frontiers in Neurology*, *10*, 999.

Thaut, M. H., Stephan, K. M., Wunderlich, G., Schicks, W., Tellmann, L., Herzog, H., McIntosh, G. C., Seitz, R. J. & Hömberg, V. (2009). Distinct cortico-cerebellar activations in rhythmic auditory motor synchronization. *Cortex*, *45*(1), 44-53.

Thompson, N., Johnston, L. & Ross, R. (2021). Real-time feedback to improve gait in children with cerebral palsy. *Digital Health*, *7*, 1-9.

Vandervoort, A. A. (2002). Aging of the human neuromuscular system. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, *25*(1), 17-25.

Wang, Y. N., Wen, X. N., Chen, Y., Xu, N., Zhang, J. H., Hou, X., Liu, J. P., Li, P., Chen, J. Y., Wang, J. H. & Sun, X. Y. (2024). Effects of movement training based on rhythmic auditory stimulation in cognitive impairment: A meta-analysis of randomized controlled clinical trial. *Frontiers in Neuroscience*, *18*, 1360935.

Welter, M. L., Do, M. C., Chastan, N., Torny, F., Bloch, F., Du Montcel, S. T. & Agid, Y. (2007). Control of vertical components of gait during initiation of walking in normal adults and patients with progressive supranuclear palsy. *Gait & Posture*, *26*(3), 393-399.

Xu, Q., Ou, X. & Li, J. (2022). The risk of falls among the aging population: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Public Health*, *10*, 902599.

Yu, D. J., Yu, A. P., Bernal, J. D., Fong, D. Y., Chan, D. K., Cheng, C. P. & Siu, P. M. (2022). Effects of exercise intensity and frequency on improving cognitive performance in middle-aged and older adults with mild cognitive impairment: A pilot randomized controlled trial on the minimum physical activity recommendation from WHO. *Frontiers in Physiology*, *13*, 1021428.