

Effects of Sensorimotor Synchronization Training on Anticipatory Postural Adjustments according to the Muscle Function in the Elderly

Eunhwi Jeong, Donghwi Suh, Jaeuk Jeong*

Department of Physical Education, College of Education, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

Received: March 14, 2023

Accepted: May 15, 2023

Published online: July 31, 2023

Keywords:

Anticipatory Postural Adjustments (APA)
Center of Pressure (COP)
Sensorimotor Synchronization Training (SMSt)



ABSTRACT

OBJECTIVES Anticipatory postural adjustments (APA) are used by humans to counteract the perturbation caused by the initiation of walking. Many previous studies have shown that APA can be improved through sensorimotor interventions. Therefore, the purpose of this study is to investigate the effectiveness of sensorimotor intervention strategies for improving APA in the elderly.

METHODS 20 healthy elderly participants were recruited and divided into two groups according to the diagnostic criteria for sarcopenia. Sensorimotor synchronization training (SMSt) utilizing auditory signals was used as intervention to improve the APA. APA was measured during the performance of lifting the foot and narrow walking tasks to compare the continuity of movement, and walking speed was measured to assess task performance. In order to compare the change of APA, we compared the displacement of center of pressure (COP) and torque before the movement occurred.

RESULTS The results showed that the inter limb transfer effect was observed in all tasks. Although no difference between the group was observed in the foot raising task, there were significant increase in the foot speed, the magnitude and torque of the APA. Such changes are considered as a strategy for offsetting an increased perturbation of the faster foot after SMSt. Unlike the raising foot task, different aspects were observed in the narrow stride walking task. In the narrow stride walking task, although the foot speed increased, there was no increase in the magnitude and torque of APA. Furthermore, the group with low muscle function showed a decrease in static.

CONCLUSIONS The differences in the continuity of motor tasks observed in this study support the hypothesis that SMSt can enhance motor control and improve postural function.

© The Asian Society of Kinesiology and the Korean Academy of Kinesiology

서론

노인에게 낙상은 부상과 관련된 가장 흔한 사고의 원인이다[1]. 낙상은 흔히 이동을 시작하거나 한발로 지면을 지지하는 과정에서 균형을 잃게 되면서 발생하게 되는데, 이를 예방하기 위해서는 노인의 신체적 특성과 보행에 대한

기본적인 움직임 이해하는 것이 선행되어야 한다[2]. 인간의 보행은 정지 상태에서 움직임이 발생하기 직전 지지하는 다리의 균형이 불안정해지고, 다시 균형을 잡기 위해 무게 중심을 다음 지지하는 다리로 옮기는 전략을 사용한다. 이때, 무게 중심을 지지하는 다리로 적절하게 이동하지 않으면 관성과 중력에 의해 신체의 균형은 스윙하는 발 방향으로 무너지게 된다. 따라서, 인간은 예측자세조절(anticipatory postural adjustments; APA) 전략을 사용하여 보행 중 무게 중심을 효과적으로 이동하고, 이를 통해 동작의 안정성을 확보하게 된다. APA란, 예상되는 섭동(perturbation)이 발

*The first two authors contributed equally to this work

*Correspondence: Jaeuk Jeong, Ph.D., Department of Physical Education, College of Education, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea; Tel: +82-10-8486-4310; E-mail: planmars@snu.ac.kr

ORCID Eunhwi Jeong <https://orcid.org/0009-0008-6506-196X>
Donghwi Suh <https://orcid.org/0000-0001-6188-6958>
Jaeuk Jeong <https://orcid.org/0000-0001-6582-8667>



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

생하기 전 자세와 관련된 근육을 활성화하거나 동작을 생성하여 예상되는 섭동을 상쇄하는 전략을 말한다[3-5]. 구체적으로, 인간의 보행이 시작되기 전 두 다리의 압력중심은 APA 전략으로 신체의 뒤-외측(posterior-lateral) 방향으로 미리 이동하게 되며, 이때 발이 지면에서 떨어져 움직이는 유각기(swing phase)의 섭동이 상쇄되게 된다. 하지만, 노인의 경우 이러한 APA 능력이 근육량 감소와 같은 다양한 원인에 의해 감소하게 되고, 결국 섭동에 대한 자세 안정성이 감소하기 때문에[6,7], 이를 방지하기 위한 효과적인 APA 전략을 탐구하는 것은 매우 중요하다.

Asian Working Group for Sarcopenia(AWGS)는 연령이 증가함에 따라 근육량, 신체적 능력, 근력 등이 특정 기준 이하로 감소하는 것을 근감소증으로 분류하고 있다[8]. 이는 노인의 원활한 움직임에 제약이 되는 변인들로 국가적으로는 근감소증을 질병으로 분류하여 신체기능을 유지하고 향상시키기 위해 운동중재를 제공하여 해결하고자 노력하고 있다. 근감소증을 진단하는 항목 중 신체검사는 근육의 크기와 힘, 감각, 반사 등의 요인을 평가한다. 구체적으로는 신체적 기능을 평가하는 걷기, 앉았다 일어서기와 같은 운동과제가 사용되고 있다[8]. 이들 운동과제는 균형능력이 필수적으로 요구되는 기본 동작을 포함하는데, 이 동작들을 적절하게 수행하기 위해서는 APA가 직접적으로 관련되는 것으로 알려져 있다[6,9,10]. 또한, 근력 및 균형 능력과 함께 감각, 반사는 움직임을 예측하고 반응하는 APA가 효과적으로 작동하기 위한 지각과 동작의 유기적인 흐름에서 중요한 요소임을 알 수 있다. 결과적으로 근감소증은 그 판단 영역과 정의적 측면에 따라 APA가 필수적으로 연관됨을 알 수 있으나, 노인의 운동기능감소와 APA의 관계를 바탕으로 신체적 기능 향상을 위한 시도, 특히 운동학적 측면에서의 연구는 부족한 실정이다.

기존 선행연구에서는 다양한 방법의 중재를 통해 APA가 향상될 수 있음을 보고하였다[7-13]. 특히, 노인[7], 건강한 성인[12], 뇌졸중 환자[13]와 같은 다양한 대상의 APA 향상을 검증한 연구에서는 메디신 볼 던지기과 같이 단일 세션의 운동중재가 효과가 있음을 확인하였다. 또한, 리드미컬한 청각 자극을 활용하여 움직임을 생성하는 감각운동 동기화 과제는 APA 기능을 향상시키는 효과적인 방법으로 재활 영역에서 활발하게 활용되고 있다[14-16]. 이러한 효과는 리드미컬한 청각 자극을 활용한 운동중재가 내적리듬(internal rhythm)을 조절하는 기저핵에 영향을 미치고, 중추신경계의 운동조절 회로라고 할 수 있는 중추패턴발생기

(central pattern generator; CPG)를 자극하기 때문에 걷기와 뛰기, 상체운동 등 다양한 운동 패턴을 생성하고 조절하는 메커니즘으로 이해될 수 있다[11]. 일반적으로 CPG는 의식적인 제어 없이도 가능한 걷기와 달리기 같은 자동적인 움직임과 관련되는데, 감각운동 동기화를 통한 CPG의 활성화는 인간의 반응과 움직임 제어에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[17]. 따라서, 감각운동 동기화를 활용한 운동중재는 인간의 운동 시스템을 활성화시키고, 결국 APA 기능 향상에 중요한 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

일반적으로 감각운동 동기화는 주기적인 연속 자극에 동작을 일치시키는 것이며, 손가락 태핑(tapping), 원 그리기와 같은 연속 운동과제가 사용된다[18,19]. 그러나 일상적인 생활의 움직임은 걷기, 수영, 자전거 타기와 같이 동작이 반복되는 연속 움직임과 공 던지기, 테니스 스트로크, 한 발 점프처럼 동작의 시작과 끝이 분명히 존재하는 불연속 움직임이 다양하게 존재한다. 이처럼, 분명하게 구분할 수 있는 정지 구간의 유무는 동작의 연속성을 결정하는 요인으로 두 움직임을 생성하는 기전 또한 특성에 따라 구별되는 것으로 알려져 있다[20,21]. 하지만, 동작의 두 가지 특성에 대한 통합적 접근은 부족하기에 본 연구에서는 연속 동작인 걷기 과제와 불연속 동작인 발 들어올리기 과제를 활용하여 APA 기능과 어떤 관련성이 있는지 동작의 연속성을 구분하여 확인하고자 하였다. 특히, 근육량이 적은 노인을 대상으로 감각운동 동기화와 APA에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고 아직까지 명확하게 밝혀지지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 노인의 낙상 위험을 감소시키기 위한 감각운동 동기화 운동중재의 효과를 확인하고자 하였다. 이를 위해, 청각 자극을 통한 감각운동 동기화 훈련(sensorimotor synchronization training; SMSt)을 진행하고 이를 운동기능 수준과 동작의 연속성에 따라 APA 기능에 어떤 효과를 미치는지 확인하고자 하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 선행연구의 한계를 극복하고 운동기능이 낮은 노인의 APA를 향상시키는 가능성을 확인하여 실제 재활 및 운동처방에 적용할 수 있는 과학적 근거를 마련하고자 하였다.

연구방법

1. 연구대상

연구에 필요한 표본크기를 산출하기 위해 G*Power 소프트웨어(ver. 3.1.9.4)를 사용하였으며(effect size = 0.4;

$\alpha=.05$; power = .95), 반복측정 이원분산분석의 그룹이 2 개인 경우 표본크기는 최소한 16명이 필요한 것으로 산출되었다. 이에 따라 본 연구는 중도 탈락자를 고려하여 A시 지역의 65세 이상 노인 남녀 20명을 모집하였다. 모집은 연구윤리위원회에서 승인을 받은 모집문건을 이용하여 진행하였으며, 모집된 연구참여자들을 완화된 근감소증 진단 기준에 따라 두 집단으로 구분하였다. 완화된 근감소증 진단 항목 중 근육량(남자: 11kg/m², 여자: 9kg/m², 악력(남자: 28kg, 여자: 20kg), 신체적 능력(short physical performance battery: SPPB: 11점) 기준을 활용하여[8], 측정결과 세 영역 모두 기준에 미치지 못한 경우 운동기능 하위집단(L-group), 한 가지 항목에서 기준보다 이상인 경우 상위 집단(H-group)에 배정하였다. 연구 참여자 중 비슷한 연구에 참여한 경험이 있거나, 과제 수행에 신경 및 정형학적 어려움이 있는 경우 연구대상에서 제외하였다. 모든 연구 과정은 연구 참여자의 자발적인 동의와 생명윤리위원회의 윤리적 지침을 준수하며 진행되었다(No. 2206/003-005).

2. 실험장비 및 과제

APA 및 균형능력을 측정하기 위해 지면반력 측정기(force plates, Bertec®, USA)를 사용하여 압력중심(center of pressure; COP) 데이터를 수집하였다(sample rate: 1,000Hz). COP 이동 방향은 신체를 기준으로 내-외측(medial-lateral) 방향을 X축, 앞-뒤(anterior-posterior) 방향을 Y축, 수직 방향을 Z축으로 설정하였다. 움직임의 속도는 제1중족골과 뒤꿈치에 반사 마커를 부착하여 동작분석 카메라(Miquis, Qualisys, Sweden)를 활용하여 측정하였다. 연습 구간에서는 IM 장비(Interactive Metronome, Interactive Metronome®, USA)를 사용하여 SMSt를 진행하였다.

본 연구에서는 불연속 동작인 발 올리기 과제와 연속 동

작인 좁은 보폭 걷기 과제가 사용되었다. 발 올리기 과제에서 있는 상태에서 본인의 정강이뼈 길이의 50% 높이에 구조물에 최대한 빠르게 발을 올리는 동작으로 설정하였다. 동작의 시작은 3초 전부터 발생하는 청각 자극으로부터 세 번째 자극을 예측하여 이루어지도록 설정하였으며, 시선은 전방에 표시된 한 점에 고정하도록 하였다. 좁은 보폭 걷기 과제는 서 있는 상태에서 15초간 좁은 보폭으로 최대한 빠르게 걷도록 하였다. 이때, 보폭은 참여자의 발 크기로 설정하여 보행에 대한 운동학적 변화를 통제하였다. 두 가지 과제 모두 사전, 사후, 파지 검사에서 5회의 연습수행 후 5회 본 측정이 이루어졌다.

APA 향상을 위한 SMSt는 연구참여자가 선호하는 템포의 청각 자극(beep)에 따라 손뼉을 치는 감각운동 동기화 운동과제로 설정하였다. 연구 참여자의 선호하는 박수 템포를 사전에 측정하였고, 박수치는 자세는 편하게 서있는 상태에서 일정하게 제공되는 청각 자극에 맞춰 두 손으로 어깨너비 크기의 원을 명치 앞쪽의 관상면에서 그리도록 하였다. 한번의 수행은 1분간 진행되었고 수행 후 10분의 충분한 휴식을 제공하였으며, 총 5세트로 구성되어 진행되었다. 한 명의 연구 참여자 측정에는 약 1시간이 소요되었다. 선호하는 속도는 과제 수행에서 발생하는 피로를 최대한 줄일 수 있어 피로에 의한 효과를 최대한 통제할 수 있고, 동작의 기본 특성은 선호하는 속도에서 반영된다는 선행연구를 바탕으로 하였다[22].

3. 자료처리 및 통계분석

본 연구에서 지면반력 측정기에서 수집된 COP 데이터는 정적 가변성(mm), APA 크기(mm), APA 토크(Nm) 산출에 활용되었다. 정적 가변성은 청각 신호를 제공하기 전 12초 동안 서 있는 상태에서 내-외측 방향 COP 변위의 분산으로 계산되었으며, APA 크기는 내-외측 방향으로 COP



Figure 1. Experiment equipment (From left to right: force plate, motion capture camera, IM).

가 이동하는 최대 변위로 산출되었다[23]. 이때, 발생하는 최대 토크를 APA 토크라 정의하였다. 동작분석 장비에서 측정된 위치 데이터를 활용하여 움직임의 시작(t_0)을 정의하고, 청각 신호가 제공된 후 5초 사이에 나타나는 발의 최대 속도(m/s)를 수집하였다. 움직임의 시작은 연구 대상 뒤꿈치에 부착된 동작분석 마커의 z축 움직임이 안정된 상태의 평균값보다 표준편차가 10배 이상이 되는 시점으로 정의하였다.

본 연구는 집단(2수준: 운동기능 상, 하) 및 측정 시기(3수준: 사전, 사후, 파지)에 따른 SMSt의 효과를 비교하기 위해 SPSS 26.0을 사용하여 반복측정이 있는 이원분산분석(two way ANOVA with repeated measures)을 실시하였다. 주효과 및 상호작용 효과가 발생하는 경우 *Bonferroni* 사후검정을 실시하였으며, 통계적 유의수준은 .05로 설정하였다.

결과

1. 연구 참여자의 특성

본 연구는 노인의 운동기능에 따른 APA 차이를 조사하기 위해서 근육량, 악력, 신체적 능력을 측정하여 운동기능 상위집단(H-group)과 하위집단(L-group)으로 구분하여 진행하였다. 집단의 나이, 성별, 근육량, 악력, 신체적 능력에 대한 특성은 <Table 1>과 같다.

2. 불연속 운동과제(발 올리기)의 수행력 비교

발 올리기 과제에서 집단과 측정 시기에 따른 SMSt의 효과를 분석한 결과, <Table 2>와 같이 측정 시기에 따라 APA 크기($F = 5.119, p < .05, \eta^2 = 0.221$), APA 토크($F =$

$3.954, p = .05, \eta^2 = .180$), 동작의 최대 속도($F = 15.367, p < .001, \eta^2 = .461$)에 대한 주효과가 나타났으나, 집단에 따른 주효과 및 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 주효과에 대한 사후검정 결과, APA 크기와 APA 토크는 사전검사(APA 크기: 29.5mm; APA 토크: $M = 18.5\text{Nm}$)보다 사후검사(APA 크기: 38.6mm; APA 토크: 24.4Nm)에서 유의하게 증가했으며(APA 크기: $p < .01$; APA 토크: $p < .01$), 동작의 최대 속도는 사전검사보다 사후검사($p < .01$) 및 파지 검사에서 유의하게 증가하였다($p < .01$).

3. 연속 운동과제(좁은 보폭 걷기)의 수행력 비교

좁은 보폭 걷기 과제에서 집단과 측정 시기에 따른 SMSt의 효과를 분석한 결과, <Table 3>과 같이 측정 시기에 따른 주효과가 동작의 최대 속도에서 나타났고($F = 5.515, p = .008, \eta^2 = .235$), 사후검정 결과 사전검사($M = 5.77\text{m/s}$)보다 파지검사($M = 7.02\text{m/s}$)에서 유의하게 높게 나타났다($p = .031$). 집단 및 측정 시기에 따른 상호작용 효과는 정적 가변성에서 유의하게 나타났으며($F = 4.223, p = .023, \eta^2 = .190$), 사후검정 결과 하위집단의 경우 사전검사($M = 6.65\text{mm}$)보다 사후검사($M = 15.92\text{mm}$)에서 유의하게 증가하였다($p = .039$).

논의

본 연구는 단일세션의 감각운동 동기화 훈련이 연속, 불연속 운동과제에서 나타나는 정적 안정성 및 자세조절 특성, 그리고 동작의 속도 변화를 운동기능에 따른 집단 및 측정 시기에 따라 살펴보았다. 동작의 연속성에 따라 두 가지 운동중재가 이루어졌으며 이를 바탕으로 도출된 결과에 대

Table 1. Characteristics of participants(M±SD).

Group	Gender (n)	Age (year)	Muscle mass (kg/m ²)	Grasping power (kg)	SPPB ^a (point)
H-group	Male (5)	69.4 ± 5.6	9.8 ± 1.7 (95% CI ^b : 8.310 - 11.290)	31.73 ± 13.9 (95% CI: 19.546 - 43.914)	11.7 ± 0.3 (95% CI: 11.514 - 11.886)
	Female (5)		10.35 ± 2.3 (95% CI: 8.334 - 12.366)	18.35 ± 4.1 (95% CI: 14.756 - 21.944)	
L-group	Male (4)	72.8 ± 9.2	9.14 ± 1.5 (95% CI: 7.670 - 10.610)	19.12 ± 4.9 (95% CI: 14.318 - 23.922)	8.5 ± 2.5 (95% CI: 6.950 - 10.050)
	Female (6)		8.48 ± 0.6 (95% CI: 8.000 - 8.960)	16.16 ± 3.5 (95% CI: 13.359 - 18.961)	

p-value (Group difference) **p* > .05

**p* < .05

**p* < .05

**p* < .001

^aSPPB: Short Physical Performance Battery

^bCI: confidence interval

Table 2. Results of foot lifting task of two-way RM ANOVA.

Variables		SS	df	MS	F	p	η ²	Post-hoc
static variability (mm)	group	246.0	1	246.0	1.132	0.301	0.059	
	time	28.6	2	14.3	0.626	0.54	0.034	
	group*time	79.3	2	39.6	1.732	0.191	0.088	
	error	825.0	36	22.9				
APA ^a magnitude (mm)	group	3264.6	1	3264.6	1.97	0.177	0.099	
	time	1216.6	2	608.3	5.119	0.011*	0.221	post > pre**
	group*time	86.1	2	43.0	0.362	0.698	0.020	
APA torque (Nm)	group	324.8	1	324.8	0.498	0.489	0.027	
	time	399.2	2	199.6	3.954	0.028*	0.180	post > pre**
	group*time	289.7	2	144.8	2.870	0.070	0.138	
maximum foot speed (m/s)	group	14.8	1	14.8	0.419	0.525	0.023	
	time	57.2	2	40.2	15.367	<.001***	0.461	post > pre**, retention > pre**
	group*time	0.7	2	0.4	0.19	0.752	0.010	
	error	67.0	36	2.6				

*p < .05, **p < .01, ***p < .001

^aAPA: anticipatory postural adjustments

Table 3. Results of narrow striding task of two-way RM ANOVA.

Variables		SS	df	MS	F	p	η ²	Post-hoc
static variability (mm)	group	1459.8	1	1459.8	4.297	0.053	0.193	
	time	23.1	2	11.5	1.012	0.374	0.053	
	group*time	96.4	2	48.2	4.223	0.023*	0.190	L-group: pre>post ^a
	error	411.1	36	11.4				
APA ^a magnitude (mm)	group	1135.4	1	1135.4	1.186	0.290	0.062	
	time	1098.3	2	790.3	2.287	0.136	0.113	
	group*time	474.8	2	341.6	0.989	0.358	0.067	
APA torque (Nm)	group	368.7	1	368.7	0.866	0.364	0.046	
	time	550.4	2	430.5	2.848	0.097	0.137	
	group*time	293.4	2	229.5	1.518	0.236	0.078	
maximum foot speed (m/s)	group	52.211	1	52.2	4.333	0.052	0.194	
	time	17.7	2	8.8	5.515	0.008**	0.235	retention > pre ^a
	group*time	4.1	2	2.5	1.292	0.284	0.067	
	error	58.0	36	1.6				

*p < .05, **p < .01, ***p < .001

^aAPA: anticipatory postural adjustments

한 논의는 다음과 같다.

발 올리기 과제를 통하여 노인의 운동기능에 따른 SMSt가 불연속 동작의 APA 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 연구결과 단일 세션의 SMSt를 통해 집단에 상관없이 사전 검사에 비해 사후 및 파지검사에서 발의 움직임 속도가 증가하였고, APA 크기 및 토크가 증가하였다. 이러한 결과는,

상지의 움직임을 통한 감각운동 동기화 운동중재가 하지의 수행력 향상으로 이어지는 사지 간 전이효과로 볼 수 있다. 이는 단일세션의 SMSt가 감각과 동작에 연결되는 신경회로를 자극함으로써 기능적인 운동학습 효과가 발생했다고 해석한 기존의 연구 결과를 지지한다고 할 수 있다[24,25]. 특히, 청각 자극을 활용한 SMSt가 APA와 같은 균형능력 및

운동기능의 향상에 도움이 되는 것으로 나타났고, 이는 지각-운동 커플링(perception-action coupling) 관점에서 감각 자극이 운동 시스템을 활성화하는 운동중재의 효과로 바라볼 수 있다[26,27].

두 번째 과제인 좁은 보폭 걷기는 연속 운동으로 운동기능이 낮은 집단에서 정적 가변성이 상대적으로 높아지는 결과를 확인하였다. 이를 통해, 운동기능이 저하된 노인에게 리드미컬한 SMSt의 효과가 그렇지 않은 노인 집단보다 안정성 측면에서 오히려 부정적이라고 할 수 있다. 또한, 파지 검사에서 사전보다 발을 더 빠르게 움직였으나 APA의 크기 및 토크는 변하지 않은 결과는, 스윙하는 다리에 의해 발생되는 움직임의 가변성과 섭동을 조절하기보다 동작의 속도를 조절하는 자세제어 전략을 사용한 것으로 사료된다.

동작의 연속성에 따른 두 과제를 운동중재로 활용한 결과 불연속 운동과제는 APA 기능에 효과적이었으나, 연속 운동과제는 APA에 영향을 미치지 않고 정적 안정성을 감소시키는 효과를 보였다. 일반적으로 두 움직임의 연속성이 같은 특성을 보이는 경우, 동작 간 적합성(compatibility)이 존재하기 때문에 운동수행에 미치는 상호효과가 있다고 알려져 있다[28]. 따라서, 본 연구에서 APA의 크기와 토크는 동작을 시작하기 전 나타나는 불연속적 상황에서의 운동학적 변인으로, 발 올리기 동작과 같은 동작 간 적합성이 있다고 할 수 있으며, 이로 인해 운동중재의 효과가 발생했다고 여겨진다.

일반적으로 노인은 보행에서 안정성을 빠르게 움직이는 것보다 우선순위로 두고 움직이는 것으로 알려져 있다 [29,30]. 하지만, 본 연구에서 관찰된 결과를 통해 운동중재는 보행의 속도 증가를 가져왔으며, 이는 안전성을 우선시하는 소극적 전략이 아닌, 훈련을 통해 과제 목표를 달성하기 위한 적극적 수행으로 운동기능이 향상된 것이라 판단할 수 있다. 이러한 전략은 집단 간 정적 안정성 향상에도 차이를 보였는데, 운동기능이 낮은 집단에서 정적 안정성이 감소하였는데, 이러한 결과는 안정성을 확보하는 능력이 낮은 L 집단에서 예측된 타이밍에 움직이며 동작의 속도를 증가시키며 나타난 현상이라 사료된다.

이처럼, 움직임에서 우선시하는 전략의 변화는 예측을 준비하는 기능의 기저핵과 CPG의 영향력이 강화되는 현상으로 여겨지지만, 본 연구에서는 뇌 활성화나 신경계의 활동에 대한 정량적인 조사가 이루어지지 않았기 때문에 현재의 연구 결과만으로 정확한 제어 기전을 단정하기에 한계가 있다. 또한, 운동기능을 근감소증을 기준으로 설정하였으나,

보다 명확한 운동기능에 대한 기준 적용을 위해서는 운동 제어에 관여하는 신경학적, 생리학적 요인에 대한 추가적인 접근이 추후 연구에서는 필요하다.

최근 노인의 건강한 삶을 저해하는 운동기능 저하를 예측하고, 예방하기 위한 운동중재에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구에서 사용한 두 가지 과제는 일상적인 생활에서 주로 사용되는 동작을 포함하는 것으로, 이를 자세 안정성과 운동학적 조절 전략, 그리고 동작의 속도라는 다양한 측면에서 살펴보았다는 의미가 있다. 더욱이, 중재 프로그램을 통해 동작의 연속성에 따라 운동기능 향상의 효과를 차별적으로 확인한 접근은 운동기능 저하로 신체활동에 어려움이 있는 노인에게 인간의 기본 움직임을 원활하게 제어할 수 있는 건강한 삶을 영위하는데 도움을 줄 것이라 기대한다.

결론

본 연구에서는 운동기능의 차이가 있는 집단에게 움직임 특성이 다른 두 과제에서 청각 자극을 활용한 SMSt가 어떤 효과를 가져오는지 검증하였다. 연구결과, SMSt는 걷기와 관련된 움직임 기능에 긍정적인 효과가 있음을 확인하였으며, 특히 운동기능이 감소한 노인의 경우 적극적으로 보행 속도를 증가시켜 움직임의 안정성을 확보하는 전략적 학습 효과가 있는 것으로 나타났다. 결론적으로, 감각운동 동기화를 활용한 운동중재가 현장에 효율적으로 적용되기 위해서는 대상의 신체적 특징과 인지적 전략, 그리고 과제의 다양한 측면을 고려한 접근이 필요한 것으로 나타났다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Organization WH, Ageing WHO, Unit LC. WHO: global report on falls prevention in older age. World Health Organization, 2008.
2. Salzman B. Gait and balance disorders in older adults. *American Family Physician*. 2010; 82(1):61-8.
3. Massion J. Movement, posture and equilibrium: Interaction and coordination. *Progress in Neurobiology*. 1992; 38(1):35-56.

4. Aruin AS, Latash M. The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations. *Experimental Brain Research*. 1995; 106(2):291-300.
5. Li X, Aruin AS. The effect of short-term changes in the body mass on anticipatory postural adjustments. *Experimental Brain Research*. 2007; 181(2):333-46.
6. Kanekar N, Aruin AS. The effect of aging on anticipatory postural control. *Experimental Brain Research*. 2014; 232(4):1127-36.
7. Aruin AS, Kanekar N, Lee YJ, Ganesan M. Enhancement of anticipatory postural adjustments in older adults as a result of a single session of ball throwing exercise. *Experimental Brain Research*. 2015; 233(2):649-55.
8. Chen LK, Liu LK, Woo J, et al. Sarcopenia in Asia: Consensus Report of the Asian Working Group for Sarcopenia. *Journal of the American Medical Directors Association*. 2014; 15(2):95-101.
9. Jagdhane S, Kanekar N, S Aruin A. The effect of a four-week balance training program on anticipatory postural adjustments in older adults: a pilot feasibility study. *Current Aging Science*. 2016; 9(4):295-300.
10. Aruin A, Shiratori T. Anticipatory postural adjustments while sitting: The effects of different leg supports. *Experimental Brain Research*. 2003; 151:46-53.
11. Hiraoka K, Kunimura H, Oda H, Kawasaki T, Sawaguchi Y. Rhythmic movement and rhythmic auditory cues enhance anticipatory postural adjustment of gait initiation. *Somatosensory & Motor Research*. 2020; 37(3):213-21.
12. Kanekar N, Aruin AS. Improvement of anticipatory postural adjustments for balance control: effect of a single training session. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2015; 25(2):400-5.
13. Curuk E, Lee Y, Aruin AS. Individuals with stroke improve anticipatory postural adjustments after a single session of targeted exercises. *Human Movement Science*. 2020; 69:102559.
14. Boyer E, Caramiaux B, Hanneton S, Roby-Brami A, Houix O, Susini P, Bevilacqua F. Sensori-motor Learning in Movement-Sound Interactive Systems: a Review. 2014.
15. Myers JB, Wassinger CA, Lephart SM. Sensorimotor contribution to shoulder stability: effect of injury and rehabilitation. *Manual Therapy*. 2006; 11(3):197-201.
16. Ghai S, Ghai I. Effects of rhythmic auditory cueing in gait rehabilitation for multiple sclerosis: a mini systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Neurology*. 2018; 9:386.
17. McCrea DA, Rybak IA. Organization of mammalian locomotor rhythm and pattern generation. *Brain Research Reviews*. 2008; 57(1):134-46.
18. Repp BH. Sensorimotor synchronization and perception of timing: effects of music training and task experience. *Human Movement Science*. 2010; 29(2):200-13.
19. Repp BH, Su YH. Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin & Review*. 2013; 20:403-52.
20. Hogan N, Sternad D. On rhythmic and discrete movements: reflections, definitions and implications for motor control. *Experimental Brain Research*. 2007; 181:13-30.
21. Huys R, Studenka BE, Rheaume NL, Zelaznik HN, Jirsa VK. Distinct timing mechanisms produce discrete and continuous movements. *PLoS Computational Biology*. 2008; 4(4):e1000061.
22. Cheung VC, Cheung BM, Zhang JH, et al. Plasticity of muscle synergies through fractionation and merging during development and training of human runners. *Nature Communications*. 2020; 11(1):1-15.
23. Yiou E, Caderby T, Hussein T. Adaptability of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement. *World Journal of Orthopedics*. 2012; 3(6):75.
24. Nombela C, Hughes LE, Owen AM, Grahn JA. Into the groove: can rhythm influence Parkinson's disease?. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2013; 37(10):2564-70.
25. Rochester L, Baker K, Hetherington V, et al. Evidence for motor learning in Parkinson's disease: acquisition, automaticity and retention of cued gait performance after training with external rhythmical cues. *Brain Research*. 2010; 1319:103-11.
26. Kitatani R, Umehara J, Hirono T, Yamada S. Rhythmic auditory stimulation during gait adaptation enhances

- learning aftereffects and savings by reducing common neural drives to lower limb muscles. *Journal of Neurophysiology*. 2022; 128(5):1324-36.
27. Farrow D, Abernethy B. Do expertise and the degree of perception—action coupling affect natural anticipatory performance?. *Perception*. 2007; 32(9):1127-39.
28. Zelic G, Varlet M, Kim J, Davis C. Influence of pacer continuity on continuous and discontinuous visuo-motor synchronisation. *Acta Psychologica*. 2016; 169:61-70.
29. Luchies CW, Schiffman J, Richards LG, Thompson MR, Bazuin D, DeYoung AJ. Effects of age, step direction, and reaction condition on the ability to step quickly. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*. 2002; 57(4):M246-M249.
30. Patla A, Frank JS, Winter DA, Rietdyk S, Prentice S, Prasad S. Age-related changes in balance control system: initiation of stepping. *Clinical Biomechanics*. 1993; 8(4):179-84.