KJSB

Korean Journal of Sport Biomechanics 2021; 31(4): 259-269
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2021.31.4.259
http://e-kjsb.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

Age-related Bimanual Coordination Impairments in Elderly People: a Systematic Review and Meta-analysis

건강한 노인의 양손 협응성 변화 패턴: 체계적 문헌고찰 및 메타분석 연구

Rye Kyeong Kim[1,3], Nyeonju Kang[1,2,3]

[1]Department of Human Movement Science, Incheon National University, Incheon, South Korea
[2]Division of Sport Science, Sport Science Institute, & Health Promotion Center, Incheon National University, Incheon, South Korea
[3]Neuromechanical Rehabilitation Research Laboratory, Incheon National University, Incheon, South Korea

Received : 12 October 2021
Revised : 25 October 2021
Accepted : 10 November 2021

Corresponding Author
Nyeonju Kang
Neuromechanical Rehabilitation Research Laboratory, Division of Sport Science & Sport Science Institute, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 21020, South Korea

Email : nyunju@inu.ac.kr

Objective: The purpose of this systematic review and meta-analysis was to investigate age-related bimanual coordination functions in older adults.

Method: Thirteen studies that compared bimanual coordination functions in older adults with those in healthy young adults qualified for this meta-analysis. We additionally categorized 21 total comparisons from the 13 qualified studies into two types of task-related moderator variables: (1) kinematic versus kinetic movements and (2) symmetry versus asymmetry movements.

Results: Random effects model meta-analysis found that older adults revealed significant bimanual coordination impairments as compared with young adults (Hedges's g = -0.771; $p < .0001$; $I^2 = 74.437\%$). We additionally confirmed specific bimanual coordination deficits using two moderator variables: 1) kinematic (Hedges's g = -0.884; $p < .0001$; $I^2 = 0.000\%$) and kinetic (Hedges's g = -0.666; $p = .023$; $I^2 = 86.170\%$). 2) symmetry (Hedges's g = -0.712; $p = .001$; $I^2 = 74.291\%$) and asymmetry (Hedges's g = -0.817; $p < .0001$; $I^2 = 76.322\%$). The moderator variable analysis indicated older adults indicated bimanual coordination deficits in the upper extremities than healthy young adults while performing kinematic bimanual coordination tasks and asymmetry coordination tasks.

Conclusion: These findings suggest that developing motor rehabilitation programs based on asymmetric bimanual movement task for enhancing interlimb coordination functions of older adults may be crucial for increasing their independence in everyday activities. Given that elderly revealed the deficits in lower extremities coordination when older adults perform gait, posture, and balance, future studies should estimate lower limb coordination functions in elderly people.

Keywords: Older adults, Bimanual coordination, Interlimb coupling, Meta-analysis

INTRODUCTION

노화는 시간이 지남에 따라 나타나는 진행성 기능 상실을 의미하며, 나이의 증가에 따른 신체 구조 및 기능 저하, 생식력의 감퇴 및 사망률의 증가 등이 복합적으로 나타나는 현상을 의미한다(Cheon, 2007; Shin, 2013). 노화는 뇌의 구조와 기능 변화에도 영향을 미치며, 이는 대뇌의 인지 및 실행 기능을 담당하는 전측(anterior) 부위의 전두엽(frontal), 전전두엽(prefrontal)의 부피 감소를 야기한다(Good et al., 2001; Jernigan et al., 2001; Raz et al., 1997; Resnick, Pham, Kraut, Zonderman & Davatzikos, 2003). 또한, 대뇌의 좌우 반구 사이를 연결하고 있는 뇌량(corpus callosum)의 크기 감소에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Raz et al., 1997).

뇌의 구조적 및 기능적 변화는 일반적으로 일차운동피질(primary motor cortex; M1), 보조운동영역(supplementary motor area; SMA) 및 전운동피질(premotor cortex; PMC) 등 운동 능력을 담당하는 다양한 뇌의 영역에서 나타난다(Kim, Cho & Yoo, 2017; Seidler et al., 2010). 운동을 담당하는 뇌의 영역들은 양손 운동 시 적절한 동작을 조직화하고 율동적인 움직임을 제어함으로써 양손 운동 시 협응 동작을 수월하게 하는 역할을 담당한다(Magill & Anderson, 2021). 하지만 노화로 인해 대뇌의 부피 감소 등의 구조적인 변화가 발생하게 되면 상지 간 근육의 발현 및 근 활성도의 동기화 등 운동을 담당하는 영역에도 기능적인 영향을 미치기 때문에 노인들의 운동 능력의 약화를 초래할

Copyright © 2021 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.

수 있다(Ren, Wu, Chan & Yan, 2013). 더욱이, 노인들의 뇌의 혈류량은 젊은 건강한 성인에 비해 감소하여 기억력 감퇴, 인지 기능 저하, 그리고 운동 능력이 감소하는 현상을 보인다(Park, 2004; Peters, 2002; Strong, 1998). 특히, 노인들에게 있어 운동 능력의 감소는 필수적인 동작을 어렵게 하여 그들의 독립적인 일상생활을 저해할 수 있다.

양손 협응성(bimanual coordination)은 뇌량을 통해 좌우 반구 간, 반구 내의 운동 네트워크의 신경교류(neural network connectivity)를 강화하여 나타나는 신경결합(neural coupling)의 결과라고 할 수 있다(Grefkes, Eickhoff, Nowak, Dafotakis & Fink, 2008; Swinnen & Wenderoth, 2004). 선행 연구들에 따르면 피험자들은 상지 협응성을 요구하는 과제 중에서도 동일 위상(in-phase)의 과제 수행 시 양손의 협응력이 더 강하게 나타났다. 또한, 반대 위상(anti-phase)의 과제에서 동일 위상으로 바뀌는 과제 수행 시 운동의 전환 시간이 감소함에 따라 안정성은 높은 수행력을 보였다(Kelso, Scholz & Schöner, 1988; Kelso, 1984). 이러한 현상은 인체의 운동 시스템(motor system)이 과제 수행 시 발생될 수 있는 기능적인 차이를 동일한 방향으로 동기화(positive coupling)하려는 경향을 보이며, 특히 대칭적 과제 수행 시 사지 간 동일한 근육(homologous muscle)이 활성화되어 서로 더 강하게 결합하려는 성질과 관련이 있는 것으로 보인다(Mechsner, Kerzel, Knoblich & Prinz, 2001; Peper & Carson, 1999). 즉, 피험자들은 중추신경계(central nervous system; CNS) 및 말초신경계(peripheral nervous system; PNS) 단계에서 동일한 방향의 움직임 시 신경결합이 더 쉽게 강화되기 때문에 동일 위상의 과제 수행을 더 수월하게 느낄 수 있다(Buchanan & Kelso, 1993; Carson, 2005; Swinnen, Jardin, Meulenbroek, Dounskaia & Den Brandt, 1997).

노인들의 경우, 난이도가 쉬운 과제에서는 효과적인 수행력을 보이지만, 어려운 과제에서는 필요되는 신경 자원(neural resource)의 한계로 인해 과포화 상태가 되어 오히려 비효율적인 수행력을 보였다. 양손 협응성을 필요로 하는 과제 중에서도 노인들은 특히 젊은 성인들보다 서로 다른 근육(non-homologous muscle)을 사용하는 반대 위상의 과제 수행을 더 어려워하는 것으로 나타났다. 아마도 난이도 높은 과제 수행 시 노인들의 좌우 반구 간 운동 능력을 담당하는 뇌 영역들의 연결성(interhemispheric connectivity)이 필요이상으로 강해지며, 과활성화(overactivation)되기 때문인 것으로 보인다(Goble et al., 2010; Heitger et al., 2013).

앞서 언급한 바와 같이 노화는 중추신경계 및 말초신경계에 영향을 미치기 때문에 노인들은 과제의 난이도가 증가할수록 운동 능력의 손상으로 인해 과제 수행에 더 큰 어려움을 느낄 수 있다(Contreras-Vidal, Teulings & Stelmach, 1998; Seidler et al., 2010). 양손 협응성의 감소는 설거지를 하거나 단추를 채우는 등 노인들의 일상생활에 필수적인 움직임에도 영향을 미쳐 그들의 일상생활의 독립성을 저해하는 요인이 될 수 있다(Maes, Gooijers, Orban de Xivry, Swinnen & Boisgontier, 2017; Seidler et al., 2010; Sung & Moon, 2020). 선행 메타분석 연구는 운동 시너지(motor synergy)를 통해 노인들의 사지 내(intralimb), 여러 손가락(multi-fingers)과 같은 다관절(multi-joint)에서의 협응성의 변화를 보고하였으며, 그 결과 노인들은 건강한 젊은 성인들보다 낮은 운동 시너지를 보였다(Shafizadeh, Sharifnezhad & Wheat, 2019). 또 다른 메타분석 연구에서는 노인들의 양손 과제 수행 시 가변성이 증가하며, 정확성은 감소하고 운동 수행 시간은 증가하는 등 운동 수행력(bimanual motor performances)이 건강한 젊은 성인들보다 약화되는 경향을 보였다(Krehbiel, Kang & Cauraugh, 2017).

하지만, 기존 연구들은 노화의 진행에 따른 한손 내 협응성(intralimb coordination)과 양손 운동의 수행력에 대한 변화만을 제한적으로 보고하고 있으며, 노화로 인해 실제 어떠한 형태로 양손 협응성의 변화가 나타나고 있는지에 대한 정량적인 보고는 미비한 실정이다. 노인들의 다채로운 양손 과제 수행 시 상지 간 협응성의 변화 패턴을 세분화할 수 있다면, 이는 추후 상지 협응성을 강화하는 등의 노인 운동프로그램을 개발하는데 실질적인 지표로 사용될 것이다. 따라서, 본 연구의 목적은 체계적 문헌고찰 및 메타분석(a systematic review and meta-analysis)을 이용하여 다양한 과제에서의 노인들의 양손 협응성의 변화를 정량화하여 보고하고자 한다. 특히, 과제 특성에 따라 운동학적(kinematic) 및 운동역학적(kinetic) 과제, 대칭성에 따라 대칭적(symmetric) 및 비대칭적(asymmetric) 과제로 분류하여 노인들의 협응성 변화 패턴을 세부적으로 평가하였다.

METHOD

1. 문헌 검색 및 수집

본 메타분석 연구는 PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses; PRISMA)에 근거하여 체계적으로 실시하였다(Moher, Liberati, Tetzlaff, Altman & Group, 2009). PubMed와 Web of Science을 사용하여 2020년 3월 1일부터 2021년 8월 31일까지 관련 주제 논문들을 검색하였다. 검색 시 키워드는 (old or older or elderly) and (bilateral or bimanual or interlimb) and (coordination)로 설정하였다. 본 연구는 학술지 논문, 학회 초록, 미간행 데이터 등과 같은 논문의 형태와 투고시기에는 제한을 두지 않았으며, 문헌 선택 기준은 다음과 같다(Borenstein, 2009): 1) 실험군이 노인(old adults group; OA)인 논문, 2) 반드시 젊은 성인(young adults group; YA)이 대조군으로 포함된 논문, 그리고 3) 실험군과 대조군의 상지 협응성을 평가한 논문. 이외에도 문헌분석 연구, 사례 연구, 동물실험 연구 등은 포함되지 않았으며, 대조군이 없는 단일군 실험 설계 논문, 중복 게재 논문, 주제 불일치 논문 그리고 통계값이 제시되지 않은 논문들은 제외하였다.

2. 양손 협응성의 측정 변인

노인들의 상지 협응성에 대한 변화 패턴을 구체화하기 위해 주요 측정 변인은 양손 과제 수행 시 측정된 시·공간적인 협응을 평가하는 방법들이 포함되었다. 특히, 본 연구는 과제의 특성에 따라 운동학적 과제와 운동역학적 과제를 제1 중재 변인(moderator variable)으로 설정하여 양손 협응성을 비교분석 하였다. 또한 과제의 대칭성에 따라 대칭적 과제 및 비대칭적 과제를 제2 중재 변인으로 설정하여 양손 협응성을 비교분석 하였다.

3. 메타분석 방법 및 절차

Comprehensive Meta-Analysis (version 3.0, Englewood, NJ, USA)를 활

용하여 본 메타분석 연구의 모든 통계적인 분석을 진행하였다. 노화에 따른 양손 협응성 변화 패턴 결과는 Hedges's g를 사용하여 제시하였다. 본 연구 결과의 효과크기가 음(negative)의 방향일 때는 노인들이 젊은 성인들보다 양손 협응성 기능이 약화되며, 양(positive)의 방향일 때는 노인들이 젊은 성인들보다 양손 협응성의 기능이 개선되는 것으로 해석하였다. 모든 메타분석 분석은 Random effects model을 사용하였다(Borenstein, 2009).

이질성은 Q-statistics과 실제 이질성 분산 비율인 Higgins and Green's I^2 지수를 사용하여 제시하였다(Borenstein, Higgins, Hedges & Rothstein, 2017; Higgins & Thompson, 2002). 출판 편향성 검사는 통계적 분석 방법인 Egger's regression intercept test를 사용하여 검사하였으며, Egger's regression intercept (β_0) 간의 p-value가 .05보다 작을 경우 편향성이 있다고 판단하였다(Egger, Smith, Schneider & Minder, 1997).

추가적으로 본 연구는 Newcastle-Ottawa Scale (NOS)을 사용하여 포함된 개별 논문들의 질 평가를 실시하였다(Herzog et al., 2013; Wells et al., 2000). NOS 평가 영역은 4가지 질문에 대해 최대 별 5개를 평가하는 선택(selection) 영역, 2가지 질문에 대해 최대 별 2개를 평가하는 비교 가능성(comparability) 영역, 마지막으로 2가지 질문에 대해 최대 별 3개로 평가 가능한 결과(outcome) 영역으로 분류할 수 있다. NOS의 점수 기준은 다음과 같다: 1) 낮은 질(low quality) = 0~4개, 2) 보통의 질(moderate quality) = 5~6개, 그리고 3) 높은 질(high quality) = 7개 이상.

RESULTS

1. 문헌고찰 및 선정 절차

체계적인 문헌고찰을 위해 논문은 PubMed와 Web of Science를 통해 수집하였으며, 수집된 총 1,094편의 논문 중 31편의 문헌분석 연구, 76편의 사례 연구, 35편의 동물실험 연구 등은 제외되었다. 또한, 32편의 대조군이 없는 단일군 실험 설계 논문, 202편의 중복으로 게재된 논문, 698편의 주제와 일치하지 않는 논문, 그리고 7편의 통계값이 모호하게 제시한 논문들은 제외하였다. 따라서, 최종적으로 포함 기준에 부합하는 총 13편의 논문이 본 메타분석 연구에 포함되었다(Gorniak & Alberts, 2013; Hu & Newell, 2011; Jin, Seong, Cho & Yoon, 2019; Kang, Roberts, Aziz & Cauraugh, 2019; Kim et al., 2017; Leinen et al., 2016; Lin et al., 2014; Rudisch et al., 2020; Shih et al., 2021; Sparrow, Parker, Lay & Wengier, 2005; Temprado et al., 2020; Vieluf, Godde, Reuter, Temprado & Voelcker-Rehage, 2015; Zhu, Mirich, Huang, Snapp-Childs & Bingham, 2017). 본 연구에 포함된 논문의 기준은 다음과 같다: 1) 실험군이 노인인 연구, 2) 대조군이 젊은 성인인 연구, 그리고 3) 실험군과 대조군의 상지 협응성을 평가한 연구. PRISMA flow chart를 통한 논문 수집의 전체적인 과정은 다음과 같다(Figure 1).

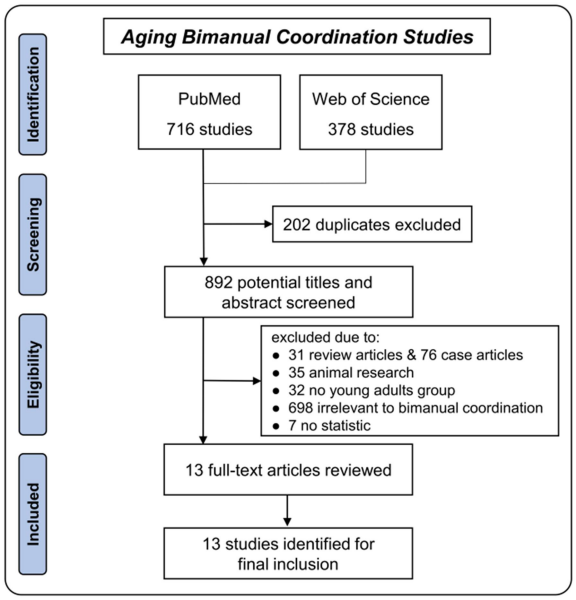


Figure 1. PRISMA flow chart for the study selection.

2. 연구 대상자 특성

본 메타분석 연구의 개별 연구들에는 223명의 노인들(mean ± SD = 68.5±15.2)과 200명의 젊은 성인들(mean ± SD = 26.1±8.7), 총 423명이 양손 협응성을 평가하는 과제에 참여하였다. 또한, 상지의 신경학적 질환이 있어 치료를 받거나, 운동 수행 시 신경계 또는 근골격계에 무리가 있는 자는 연구 대상자에서 제외되었다. 본 연구에 참여한 대상자들의 기본적인 특성은 다음과 같다(Table 1).

3. 양손 협응성 과제 특성 및 측정 변인

본 메타분석 연구는 6편의 개별 연구들은 운동학적 과제(주로 손가락, 손목, 그리고 팔을 사용한 신전/굴곡 움직임 과제(extension/flexion movement tasks), 손가락 또는 손을 이용하여 물체를 두드리는 과제(tapping task), 그리고 조이스틱을 잡아 조절하는 과제(control task) 등)를 통하여 양손 협응성을 평가하였다. 7편의 개별 연구들은 운동역학적 과제(손과 손가락의 힘을 사용하여 물체를 분해/결합하는 과제(non-rotation and rotation tasks), 손목, 손가락을 사용하여 등척성 힘을 조절하는 과제(isometric force control task) 등)를 통하여 양손 협응성을 평가하였다. 또한, 양손을 각각 이용하여 동시에 힘을 조절하거나 협응성(coordination tasks)을 발휘하는 과제, 양손으로 각각의 원을 그리는 과제(drawing two circles), 양손을 각각 또는 동시에 협력적으로 움직이는 과제, 양손가락으로 물체를 두드리는 과제, 상지를 대칭적으로 신전/굴곡하는 움직임 과제 등의 대칭적 과제와 양손을 반대 방향으로 움직이는 과제, 한손은 잡고(hold) 있고 반대손으로는 움직이거나(move), 양손을 번갈아 가면서 힘을 조절하는 과제 등의 비대칭적 과제를 통하여 양손의 협응성을 평가하였다.

각각의 논문들에 포함된 양손 협응성 과제는 다양한 실험 조건들은 설정하여 평가하였다: 1) 목표하는 힘의 수준(targeted force levels), 2) 손가락, 손, 또는 팔의 움직임 방향(both fingers, hands, or arms movement directions), 그리고 3) 시각적 정보(visual feedback) 등. 양손 협응성 측정 변인은 상관분석(Pearson correlation coefficient), 교차상관 분석(Cross-correlation analysis), 위상각 분석(Relative phase angle analysis), 기여도 분석(Coherence analysis), 그리고 비제어 다양체 분석

Table 1. Participant characteristics

Study	Participant	Age (yrs)	Gender	Hand dominant
Goniak, 2013	OG = 10 YG = 10	OG = 66.0 YG = 28.0	OG = 8 F, 2 M YG = 3 F, 7 M	OG = 10 R YG = 10 R
Hu, 2011	OG = 11 YG = 11	OG = 77.0 YG = 22.0	OG = 7 F, 4 M YG = 5 F, 6 M	OG = 11 R YG = 11 R
Jin, 2019	OG = 14 YG = 17	OG = 72.6 YG = 25.1	OG = 12 F, 2 M YG = 8 F, 9 M	OG = 14 R YG = 17 R
Kang, 2019	OG = 10 YG = 10	OG = 72.3 YG = 20.1	OG = 2 F, 8 M YG = 5 F, 5 M	OG = 10 R YG = 10 R
Kim, 2017	OG = 20 YG = 21	OG = 75.8 YG = 28.3	OG = 15 F, 5 M YG = 13 F, 8 M	OG = 20 R YG = 21 R
Leinen, 2016	OG = 14 YG = 14	OG = 71.0 YG = 23.0	OG = 7 F, 7 M YG = 7 F, 7 M	OG = 14 R YG = 14 R
Lin, 2014	OG = 10 YG = 21	OG = 80.5 YG = 23.1	OG = 2 F, 8 M YG = 6 F, 15 M	NA
Rudisch, 2020	OG = 52 YG = 19	OG = 82.3 YG = 21.0	OG = 32 F, 20 M YG = 9 F, 10 M	OG = 52 R YG = 19 R
Shih, 2021	OG = 23 YG = 23	OG = 69.5 YG = 26.3	NA	NA
Sparrow, 2005	OG = 8 YG = 8	OG = 73.1 YG = 23.3	OG = 0 F, 8 M YG = 0 F, 8 M	NA
Temparado, 2020	OG = 20 YG = 15	OG = 69.0 YG = 24.0	NA	NA
Vieluf, 2015	OG = 11 YG = 11	OG = 58.7 YG = 21.1	OG = 6 F, 5 M YG = 5 F, 6 M	OG = 11 R YG = 11 R
Zhu, 2017	OG = 20 YG = 20	OG = 22.1 YG = 53.6	OG = 10 F, 10 M YG = 10 F, 10 M	NA

F, female; L, left; M, male; NA, not available; OG, old adults group; R, right; YG, young adults group

(Uncontrolled manifold analysis)을 사용하여 평가하였다. 본 연구에 포함된 13편 논문들에 포함된 개별적인 과제 조건과 측정 변인들은 다음과 같다(Table 2).

4. 개별 연구의 질 평가

본 메타분석은 횡단적(cross-sectional) 연구에 맞게 수정된 Newcastle -Ottawa Scale (NOS)을 사용하여 개별 연구의 질 평가를 실시하였다. 각 영역의 평가 항목은 '선택(selection)' 영역의 1) a representativeness of the sample, 2) sample size, 3) non-respondents, 4) ascertainment of the exposure, 5) '비교 가능성(comparability)' 영역과 '결과(outcome)' 영역의 6) assessment of the outcome, 7) statistical test 총 7항목으로 분류하였다. NOS총 점수 5.7점(mean ± SD = 5.7±0.5; Table 3)으로 총 13편의 개별 연구들의 질은 보통이라고 평가하였다.

5. 메타분석 결과

본 메타분석은 Random effects model을 이용하였으며, 포함된 13편의 개별 연구로부터 계산된 21개 comparisons에 대한 전체평균효과 크기(overall effect size)는 다음과 같다: Overall effect size (Hedges's g) = -0.771; *SE* = 0.152; 95% CI = -1.070 ~ -0.473; $p < .0001$; I^2 = 74.437%. 결과적으로, 노인들의 양손 협응력이 젊은 성인들보다 약화된 것으로 나타났다. 이질성 검사 및 출판 편향성 검사 결과, 21개 comparisons의 이질성은 74.437%로 다소 높은 것으로 보인다(*Q*-statistics = 78.237; $p < .0001$; T^2 = 0.354; I^2 = 74.437%). 출판 편향성 검사 결과, Egger's regression intercept test의 *p*-value가 .05보다 크기 때문에 통계적으로 유의한 출판 편향성은 나타나지 않았다(β_0 = -3.06, $p = .220$).

6. 중재변인분석과 이질성 검사 및 출판 편향성 검사

노화로 인한 노인들의 양손 협응성 변화 패턴을 과제의 특성에 따라 자세하게 파악하기 위하여 제1 중재 변인을 운동학적 과제와 운동역학적 과제로 설정하여 분석하였다. 먼저, 운동학적 과제의 분석 결과는 다음과 같다: 10개 운동학적 comparisons: Hedges's g = -0.884; *SE* = 0.108; 95% CI = -1.095 ~ -0.673; $p < .0001$; I^2 = 0.000% (Figure 2). 그 결과, 노인들은 젊은 성인들과 비교하였을 때 운동학적 과제 수행 시 양손 협응성의 기능이 다소 약화되는 것으로 나타났다. 운동학적 과제에 따른 이질성 검사 결과, I^2 지수가 0.000%로 이질성이 존재하

Table 2. Bimanual coordination task and outcome measures

Study	Bimanual coordination task	Specific task condition	Outcome measure
Gorniak, 2013	Asymmetric fingers rotation/connection tasks (kinetic)	1. Connection & disconnection: to fix lower (static) transducer and rotation upper (dynamic) transducer 2. Connection & disconnection: to fix lower (static) transducer and rotation upper (dynamic) transducer 3. Rotation & non-rotation: to rotation lower (static) transducer and upper (dynamic) transducer simultaneously 4. Rotation & non-rotation: to rotation lower (static) transducer and upper (dynamic) transducer simultaneously	Correlation coefficient
Hu, 2011	Symmetric fingers force coordination tasks (kinetic)	1. Coefficient ratio condition 1:1 (L:R) with low visual information 2. Coefficient ratio condition 1:1 (L:R) with high visual information	Correlation coefficient
	Asymmetric fingers force coordination tasks (kinetic)	1. Coefficient ratio condition 0.2:1.8 (L:R) with low visual information 2. Coefficient ratio condition 0.2:1.8 (L:R) with high visual information 3. Coefficient ratio condition 1.8:0.2 (L:R) with low visual information 4. Coefficient ratio condition 1.8:0.2 (L:R) with high visual information	Correlation coefficient
Jin, 2019	Wrists/fingers extension force control task (kinetic)	1. Dual task: calculation condition and bimanual maximum voluntary force control 2. Single task: only bimanual maximum voluntary force control	1. Cross-coefficient 2. Time lag 3. Motor synergies (V_{Index})
Kang, 2019	Wrists/fingers extension force control task (kinetic)	1. With feedback at 5% of MVC 2. Without feedback at 5% of MVC	1. Correlation coefficient 2. Motor synergies (V_{Index})
Kim, 2017	Symmetric hands tapping task (kinematic)	To tap an electronic drum with both hands simultaneously at their preferred tempo	Correlation coefficient
	Asymmetric hands tapping task (kinematic)	To tap an electronic drum with both hands alteration at their preferred tempo	Correlation coefficient
Leinen, 2016	Asymmetric wrists flexion/extension movement (kinematic)	1. Drawing lissajous template under 0 kg load condition 2. Drawing lissajous template under 0.5 kg load condition 3. Drawing lissajous template under 1.0 kg load condition	Phase angle
Lin, 2014	Asymmetric wrists flexion/extension movement (kinetic)	1. 10% of MVC condition 1 2. 10% of MVC condition 2 3. 20% of MVC condition 1 4. 20% of MVC condition 2 5. 40% of MVC condition 1 6. 40% of MVC condition 2 (condition 1: from the dominant hand to the non-dominant hand), (condition 2: from the non-dominant hand and to dominant hand)	1. Force applied 2. Alternating time
Rudisch, 2020	Symmetric fingers force control task (kinetic)	Both hands drawing an alternating symmetric sine-wave force pattern at 5~12% of MVC	1. Correlation coefficient 2. Alternation time
		Both hands drawing sine-wave force pattern at 12% of MVC	1. Correlation coefficient 2. Alternation time
	Asymmetric fingers force control task (kinetic)	To maintain force level with right hand and hold/release with left hand at 5~12% of MVC	1. Correlation coefficient 2. Alternation time
		To maintain force level with left hand and hold/release with right hand at 5~12% of MVC	1. Correlation coefficient 2. Alternation time
Shih, 2021	Symmetric hands movement tasks (kinematic)	Drawing two circles with both hands (In-phase direction)	Phase angle
	Asymmetric hands movement tasks (kinematic)	Drawing two circles with both hands (Anti-phase direction)	Phase angle
Sparrow, 2005	Asymmetric hand movement tasks (kinematic)	1. Both hands moved on 180° condition with metronome rhythm 2. Both hands moved on 180° condition with metronome rhythm (retention)	Phase angle

Table 2. Bimanual coordination task and outcome measures (Continued)

Study	Bimanual coordination task	Specific task condition	Outcome measure
Sparrow, 2005	Asymmetric hand movement tasks (kinematic)	3. Both hands moved on 90˚ condition with metronome rhythm 4. Both hands moved on 90˚ condition with metronome rhythm (retention)	Phase angle
Tmeparado, 2020	Symmetric hand pronation/supination movements task (kinematic)	1. Both hands performed reaction time from anti-phase to in-phase 2. Both hands performed reversal time from anti-phase to in-phase 3. Both hands performed total switching time from anti-phase to in-phase	Phase angle
	Asymmetric hand pronation/supination movements task (kinematic)	1. Both hands performed reaction time from in-phase to anti-phase 2. Both hands performed reversal time from in-phase to anti-phase 3. Both hands performed total switching time from in-phase to anti-phase	Phase angle
Vieluf, 2015	Asymmetric hand/fingers extension force control task (kinetic)	1. Drawing Inverted-U Curve start of left hand at the minimum 2. Drawing Inverted-U Curve end of left hand at the minimum 3. Drawing U Curve start of right hand at the maximum 4. Drawing U Curve end of right hand at the maximum	Phase angle
Zhu, 2017	Symmetric hand movement task (kinematic)	To move both of joysticks with 90˚ on the table to change from white to green dot to set of targets displayed on the computer monitor	Phase angle
	Asymmetric hand movement task (kinematic)	To move both of joysticks with 90˚ on the table to change from white to green two dots to set of targets displayed on the computer monitor	Phase angle

Abbreviations. L: left; MVC: maximum voluntary contraction; R: right

Table 3. Quality assessment of cross-sectional studies included in this meta-analysis

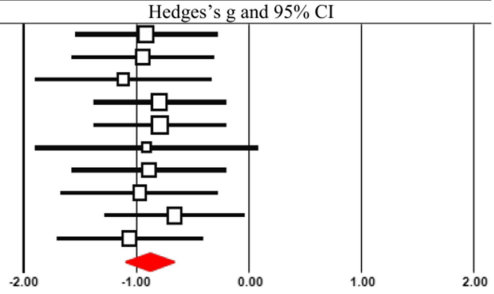
Study	RS	SS	NR	AE	C	AO	ST	Total score
Goniak, 2013	–	–	–	*	**	*	*	5 stars
Hu, 2011	–	–	–	*	**	*	*	5 stars
Jin, 2019	–	–	–	*	**	*	*	5 stars
Kang, 2019	–	*	–	*	**	*	*	6 stars
Kim, 2017	*	–	–	*	**	*	*	6 stars
Leinen, 2016	*	–	–	*	**	*	*	6 stars
Lin, 2014	*	–	–	*	**	*	*	6 stars
Rudisch, 2020	*	–	–	*	**	*	*	6 stars
Shih, 2021	–	–	–	*	**	*	*	5 stars
Sparrow, 2005	*	–	–	*	**	*	*	6 stars
Temparado, 2020	*	–	–	*	**	*	*	6 stars
Vieluf, 2015	*	–	–	*	**	*	*	6 stars
Zhu, 2017	*	–	–	*	**	*	*	6 stars

Abbreviations. AE: ascertainment of the exposure (risk factor); AO: assessment of the outcome; C: comparability; NR: non-respondents; SS: sample size; ST: statistical test; RS: representativeness of the sample. **quality criterion completely satisfied; *quality criterion satisfied; –quality criterion not satisfied or insufficient information to adjudicate as satisfied

지 않았으며, 출판 편향성 검사에서 Egger's regression intercept test 결과의 p-value가 .05보다 크기 때문에 통계적으로 유의한 출판 편향성이 나타나지 않았다(β_0 = -1.23, p = .208).

운동역학적 과제 분석 결과는 다음과 같다: 11개 운동역학적 comparisons: Hedges's g = -0.666; SE = 0.293; 95% CI = -1.241 ~ -0.091; p = .023; I^2 = 86.170% (Figure 3). 노인들은 젊은 성인들과 비교하였을 때 운동역학적 과제 수행 시 양손 협응력이 약화되는 것으로 나타났다. 운동역학적 과제에 따른 이질성 검사 결과의 I^2 지수가 86.170%

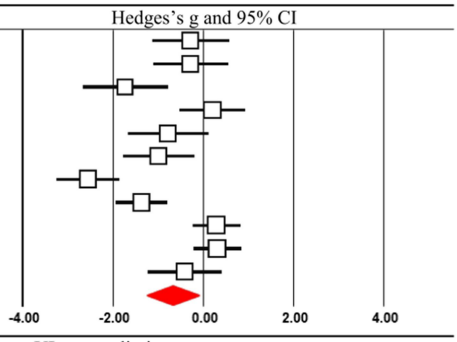
Study	Outcome	Hedges's g	SE	LL	UL	*P*-value
Kim 2017	S: kinematic coordination	-0.91	0.32	-1.54	-0.28	.005
Kim 2017	S: kinematic coordination	-0.93	0.32	-1.57	-0.30	.004
Leinen 2016	C: kinematic coordination	-1.11	0.40	-1.90	-0.33	.006
Shih 2021	S: kinematic coordination	-0.79	0.30	-1.38	-0.20	.009
Shih 2021	S: kinematic coordination	-0.79	0.30	-1.38	-0.20	.009
Sparrow 2005	C: kinematic coordination	-0.91	0.51	-1.90	0.08	.073
Temprado 2020	C: kinematic coordination	-0.88	0.35	-1.58	-0.20	.012
Temprado 2021	C: kinematic coordination	-0.97	0.36	-1.66	-0.27	.006
Zhu 2017	S: kinematic coordination	-0.65	0.32	-1.28	-0.03	.040
Zhu 2017	S: kinematic coordination	-1.06	0.33	-1.71	-0.41	.001
	Kinematic Overall	-0.89	0.11	-1.10	-0.67	<.001



Abbreviations. C: combined effect size; CI: confidence interval; ES: effect size; LL: lower limit; S: single effect size (not combined); SE: standard error; UL: upper limit.

Figure 2. Meta-analytic finding and forest plot for kinematic tasks.

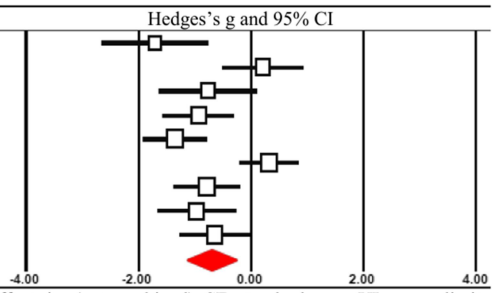
Study	Outcome	Hedges's g	SE	LL	UL	*P*-value
Gorniak 2013	C: kinetic coordination	-0.28	0.43	-1.12	0.57	.524
Hu 2011	C: kinetic coordination	-0.27	0.42	-1.10	0.56	.525
Hu 2011	C: kinetic coordination	-1.71	0.49	-2.67	-0.76	<.001
Jin 2019	C: kinetic coordination	0.21	0.37	-0.51	0.94	.566
Kang 2019	C: kinetic coordination	-0.77	0.45	-1.65	0.11	.088
Lin 2014	C: kinetic coordination	-0.97	0.40	-1.77	-0.18	.016
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	-2.54	0.35	-3.23	-1.85	<.001
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	-1.35	0.29	-1.92	-0.79	<.001
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	0.30	0.27	-0.23	0.83	.265
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	0.32	0.27	-0.21	0.84	.236
Vieluf 2015	C: kinetic coordination	-0.47	0.42	-1.29	0.35	.263
	Kinetic Overall	-0.67	0.29	-1.25	-0.10	.022



Abbreviations. C: combined effect size; CI: confidence interval; ES: effect size; LL: lower limit; SE: standard error; UL: upper limit.

Figure 3. Meta-analytic finding and forest plot for kinetic tasks.

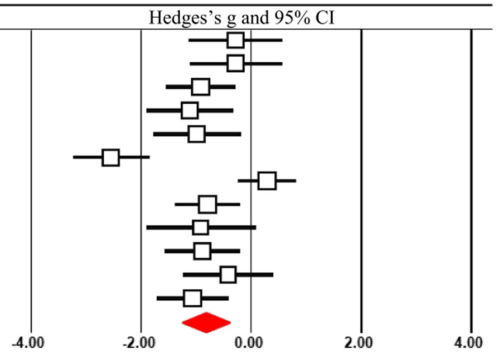
Study	Outcome	Hedges's g	SE	LL	UL	*P*-value
Hu 2011	C: kinetic coordination	-1.71	0.49	-2.67	-0.76	<.001
Jin 2019	C: kinetic coordination	0.21	0.37	-0.51	0.94	.566
Kang 2019	C: kinetic coordination	-0.77	0.45	-1.65	0.11	.088
Kim 2017	S: kinematic coordination	-0.93	0.32	-1.57	-0.30	.004
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	-1.35	0.29	-1.92	-0.79	<.001
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	0.32	0.27	-0.21	0.84	.236
Shih 2021	S: kinematic coordination	-0.79	0.30	-1.38	-0.20	.009
Temprado 2020	C: kinematic coordination	-0.97	0.36	-1.66	-0.27	.006
Zhu 2017	S: kinematic coordination	-0.65	0.32	-1.28	-0.03	.040
	Symmetric Overall	-0.71	0.22	-1.15	-0.27	.001



Abbreviations. C: combined effect size; CI: confidence interval; ES: effect size; LL: lower limit; S: single effect size (not combined); SE: standard error; UL: upper limit.

Figure 4. Meta-analytic finding and forest plot for symmetric tasks.

Study	Outcome	Hedges's g	SE	LL	UL	*P*-value
Gorniak 2013	C: kinetic coordination	-0.28	0.43	-1.12	0.57	.524
Hu 2011	C: kinetic coordination	-0.27	0.42	-1.10	0.56	.525
Kim 2017	S: kinematic coordination	-0.91	0.32	-1.54	-0.28	.005
Leinen 2016	C: kinematic coordination	-1.11	0.40	-1.90	-0.33	.006
Lin 2014	C: kinetic coordination	-0.97	0.40	-1.77	-0.18	.016
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	-2.54	0.35	-3.23	-1.85	<.001
Rudisch 2020	C: kinetic coordination	0.30	0.27	-0.23	0.83	.265
Shih 2021	S: kinematic coordination	-0.79	0.30	-1.38	-0.20	.009
Sparrow 2005	C: kinematic coordination	-0.91	0.51	-1.90	0.08	.073
Temprado 2020	C: kinematic coordination	-0.88	0.35	-1.58	-0.20	.012
Vieluf 2015	C: kinetic coordination	-0.47	0.42	-1.29	0.35	.263
Zhu 2017	S: kinematic coordination	-1.06	0.33	-1.71	-0.41	.001
	Asymmetric Overall	-0.82	0.22	-1.24	-0.39	<.001



Abbreviations. C: combined effect size; CI: confidence interval; ES: effect size; LL: lower limit; S: single effect size (not combined); SE: standard error; UL: upper limit.

Figure 5. Meta-analytic finding and forest plot for asymmetric tasks.

로 다소 이질성이 큰 것으로 판단되며, 출판 편향성 검사에서 Egger's regression intercept test 결과의 p-value가 .05보다 크기 때문에 통계적으로 유의한 출판 편향성이 존재하지 않았다(β_0 = -4.08, p = .322).

제2 중재 변인 분석으로 과제의 대칭성에 따라 대칭적 과제와 비대칭적 과제를 분류하여 분석하였다. 대칭적 과제의 분석 결과는 다음과 같다: 9개 대칭적 comparisons: Hedges's g = -0.712; SE = 0.223; 95% CI = -1.149 ~ -0.274; p = .001; I^2 = 74.291% (Figure 4). 노인들은 젊은 성인들과 비교하였을 때 대칭적 과제 수행 시 양손 협응성의 기능이 약화된 것으로 나타났다. 대칭적 과제에 따른 이질성 검사 결과, I^2 지수가 74.291%로 다소 이질성이 큰 것으로 판단되며, 출판 편향성 검사 결과, Egger's regression intercept test 결과의 p-value가 .05보다 크기 때문에 통계적으로 유의한 출판 편향성이 나타나지 않은 것으로 판단된다(β_0 = -3.69, p = .357).

비대칭적 과제 분석 결과는 다음과 같다: 12개 비대칭적 comparisons: Hedges's g = -0.817; SE = 0.217; 95% CI = -1.241 ~ -0.392; p < .0001; I^2 = 76.322% (Figure 5). 노인들은 젊은 성인들과 비교하였을 때 비대칭적 과제 수행 시 양손 협응성의 기능이 약화되는 것으로 나타났다. 비대칭적 과제에 따른 이질성 검사 결과의 I^2 지수가 76.322%로 다소 이질성이 큰 것으로 판단되며, 출판 편향성 검사에서 Egger's regression intercept test 결과, p-value가 .05보다 크기 때문에 통계적으로 유의한 출판 편향성이 나타나지 않은 것으로 판단된다(β_0 = -2.40, p = .518).

DISCUSSION

본 연구는 체계적 문헌고찰 및 메타분석을 활용하여 노화에 따른 노인들의 양손 협응성 변화 패턴을 평가하였다. 최종적으로 주제에 적합한 13편의 개별 논문들이 본 연구에 포함되었다(Gorniak & Alberts, 2013; Hu & Newell, 2011; Jin et al., 2019; Kang et al., 2019; Kim et al., 2017; Leinen et al., 2016; Lin et al., 2014; Rudisch et al., 2020; Shih et al., 2021; Sparrow et al., 2005; Temprado et al., 2020; Vieluf et al., 2015; Zhu et al., 2017). 전체적인 메타분석 결과, 전체평균효과크기 -0.771로써 노인들이 젊은 성인들보다 양손 협응성이 유의미하게 저하되었다. 과제 특성에 따라 분류한 제1 중재변인분석 결과, 10개 comparisons의 운동학적 과제와 11개 comparisons의 운동역학적 과제에서 노인들은 젊은 성인들보다 양손 협응성을 요구하는 과제 수행 시 다소 더 큰 어려움을 느끼는 것으로 나타났다. 또한, 과제의 대칭성에 따라 분류한 제2 중재변인분석 결과, 9개 comparisons의 대칭적 과제와 12개 comparisons의 비대칭적 과제에서도 노인들은 젊은 성인들보다 양손의 협응성 기능이 저하되는 것으로 나타났다.

노화로 인한 중추 및 말초신경계의 변화는 양손 협응력을 요구하는 과제 수행 시 노인들의 수행 시간을 증가시키며, 정확도는 감소시키는 등의 변화를 초래하여 젊은 성인들보다 양손 협응성의 기능을 약화시킬 수 있다. 또한, 노인들의 뇌량은 노화로 인해 크기가 감소하기 때문에, 좌우 반구 사이를 서로 억제(balancing interhemispheric inhibition)하는 힘을 약화시킨다(Raz et al., 1997) 따라서, 반구 사이를 연결(interhemispheric connections)하고 반구 간 균형을 유지하는 기능도 저하되는 것으로 알려져 있다(Craik & Jacoby, 1996; Kelso et al., 1988). 이는 노인들의 인지적 유연성(cognitive flexibility), 기억력, 인지 기능, 운동 능력을 담당하는 뇌의 전측 부위에 영향을 미치기 때문에 운동 수행 중 집중력의 저하로 이어져 양손 협응성을 포함한 운동 기능도 약화시키는 것으로 판단된다(Park, 2004; Peters, 2002; Strong, 1998). 더욱이, 인간은 일상생활 중 일반적으로 주손(dominant hand)을 더 많이 사용하기 때문에 좌우 상지 근력의 비대칭을 야기하여 노인들이 양손의 협응력을 요구하는 과제 수행 시 다소 더 큰 어려움을 느끼게 하는 것으로 사료된다(Goble, Coxon, Wenderoth, Van Impe & Swinnen, 2009; Kim et al., 2017; Seidler et al., 2010; Serrien & Brown, 2002).

추가적인 제1 중재변인분석 결과, 노인들은 양손 협응성 과제 수행 시 운동학적 및 운동역학적 과제 모두에서 젊은 성인들보다 협응성이 다소 저하되는 것으로 나타났다. 노화로 인한 중추신경계 및 말초신경계의 변화로 노인들은 과제 수행 시 목표수준에 도달하거나 유지하기 위해 적절한 운동학적인 동작을 수행하고, 또한 측정 장비를 이용하여 움직이는 동작이나 힘을 조절하는 운동역학적 동작에서도 큰 어려움을 느끼는 것으로 보인다. 이전 연구들에서는 동일 위상과 반대 위상 등을 포함하는 운동학적 과제 수행 시 노인들이 젊은 성인들보다 양손 협응성 기능이 저하되었다(Boisgontier et al., 2014; Temprado et al., 2020; Zhu et al., 2017). 또한, 힘 측정 장비를 이용하여 노인들과 젊은 성인들 사이의 양손 협응성 정도를 운동 시너지(motor synergies)를 통해 분석하는 결과에서도, 노인들은 최대 자발적 수축력(submaximal voluntary contraction)의 5%에서 젊은 성인들보다 운동 시너지 지수가 낮은 것으로 나타났다(Kang et al., 2019). 이러한 현상은 노화로 인해 뇌량의 부피가 감소하여 운동 기능 저하와 같은 신경학적 변화를 일으키기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 좌우 반구 사이를 연결하고 그 연결성을 유지하여 반구 간의 균형을 유지하는 능력을 방해하여 노인들이 양손 협응력을 필요로 하는 운동학적 및 운동역학적 과제에서 젊은 성인들보다 다소 더 큰 어려움을 느끼는 것으로 보인다(Goble et al., 2010; Heitger et al., 2013; Woytowicz, Whitall & Westlake, 2016).

제2 중재 변인인 대칭적 과제와 비대칭적 과제의 비교분석 결과, 젊은 성인에 비해 노인들은 대칭적 및 비대칭적 과제에서 모두 협응성이 나빠지는 경향을 보였으며, 대칭적 과제보다 비대칭적 과제 수행 시 상대적으로 더 큰 어려움을 느끼는 것으로 나타났다. 선행 연구에서도 피험자들은 반대 방향에서 동일한 방향으로 바뀌는 과제 수행 시 운동의 전환 시간은 단축되며, 안정성은 증가하는 경향을 보였다(Kelso et al., 1988; Kelso, 1984; Temprado et al., 2020). 이러한 이유는 중추신경계 단계에서 인체 시스템이 뇌량을 통해 좌우 반구 사이와 반구 내로 들어오는 운동에 관련된 기능적인 차이를 동일한 방향으로 동기화하려는 성질 때문인 것으로 판단된다. 또한, 말초신경계 단계에서 상지의 협응성을 필요로 하는 과제 중에서도 동일한 방향의 과제는 사지 간의 동일한 근육을 활성화 하는 과정을 통해 뇌의 좌우 반구 간의 신경결합이 더욱 강하게 이루어지기 때문에 양손의 협응성이 더 강화되는 것으로 보인다(Arya & Pandian, 2014; Grefkes et al., 2008; Kim et al., 2017; Seidler et al., 2010). 그러나, 노인들에게 있어 근육량 및 근력의 감소는 양손 협응성 과제 시 운동 기능을 조절하고, 과제 난이도에 따른 복잡한 움직임을 좀 더 수월하게 하는 등의 신경결합을 방해하여 수행력을 방해하는 것으로 나타났다(Booth, Weeden & Tseng, 1994; Verdu, Ceballos, Vilches & Navarro, 2000). 다시 말해, 이는 양손이 동일한 방향의 과제를 수행하려는 경향을 벗어나 사지 간의 서로 다른 근육을 사용하여 비대칭적인 과제를 수행해야 함으로

노인들이 다소 더 큰 어려움을 느끼는 것으로 판단된다(Kantak, Jax & Wittenberg, 2017; Temprado et al., 2020).

선행 연구에 따르면 노인들의 사지 간 협응성 기능의 저하는 하지에서도 나타났다(Hsu, Chou & Woollacott, 2013). 일어서기, 계단 오르기, 걷기 등 일상생활과 밀접한 관련이 있는 하지 협응성 기능은 일상생활과 밀접한 관련이 있기 때문에 노인들의 하지 협응성 기능 저하는 보행장애, 낙상, 자세 불균형 등의 원인이 될 수 있다(Ryu, 2021). 특히, 하지 협응성 저하는 노인들에게 있어 고관절 손상을 포함한 중증 상해 또는 사망의 주된 원인을 야기한다(Kim, Choi & Kim, 2016; Yang, Lee, Kang & Kim, 2015). 이처럼, 노인들의 일상생활에서 독립적인 신체활동을 수행하는 데 있어 하지 협응성은 매우 중요한 요소라고 할 수 있기 때문에 추후 노인들의 하지 협응성 평가에 대한 메타분석 연구도 필요하다고 판단된다.

CONCLUSION

본 메타분석 연구의 결과, 노인들은 양손 과제 수행 시 젊은 성인들보다 양손의 협응성 기능이 저하되는 것으로 나타났다. 또한, 노인들은 젊은 성인들 보다 운동학적 과제와 운동역학적 과제 모두에서 양손의 협응성 기능이 저하되는 것으로 나타났다. 특히, 대칭적 과제와 비대칭적 과제에서도 동일하게 저하된 양손 협응성을 보였지만, 노인들은 비대칭적 과제에서 다소 더 큰 어려움을 느끼는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 양손 움직임 및 힘 조절 협응력의 저하가 노화가 진행됨에 따라 뚜렷이 나타난다는 것을 의미하며, 이러한 결과를 바탕으로 다양한 양손 움직임 과제(운동학적, 운동역학적 또는 대칭적, 비대칭적 과제)들을 포함한 노인들의 협응성을 강화시킬 수 있는 운동 프로그램이 개발되고 적용되어야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2018R1C1B5084455) to NK. The funder had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript. This study is developed from Master Thesis of Rye Kyeong Kim in Incheon National University.

REFERENCES

Arya, K. N. & Pandian, S. (2014). Interlimb neural coupling: implications for poststroke hemiparesis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, *57*(9-10), 696-713.

Boisgontier, M. P., Van Halewyck, F., Corporaal, S. H., Willacker, L., Van Den Bergh, V., Beets, I. A., Levin, O. & Swinnen, S. P. (2014). Vision of the active limb impairs bimanual motor tracking in young and older adults. *Front Aging Neurosci*, *6*, 320.

Booth, F. W., Weeden, S. H. & Tseng, B. S. (1994). Effect of aging on human skeletal muscle and motor function. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *26*(5), 556-560.

Borenstein, M. (2009). *Introduction to meta-analysis*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons.

Borenstein, M., Higgins, J. P., Hedges, L. V. & Rothstein, H. R. (2017). Basics of meta-analysis: I(2) is not an absolute measure of heterogeneity. *Research Synthesis Methods*, *8*(1), 5-18.

Buchanan, J. J. & Kelso, J. A. (1993). Posturally induced transitions in rhythmic multijoint limb movements. *Experimental Brain Research*, *94*(1), 131-142.

Carson, R. (2005). Neural pathways mediating bilateral interactions between the upper limbs. *Brain Research Reviews*, *49*(3), 641-662.

Cheon, J. S. (2007). Concept of Ageing. *Journal of the Korean Society of Biological Therapies in Psychiatry*, *13*(2), 129-137.

Contreras-Vidal, J. L., Teulings, H. L. & Stelmach, G. E. (1998). Elderly subjects are impaired in spatial coordination in fine motor control. *Acta Psychologica (Amst)*, *100*(1-2), 25-35.

Craik, F. I. & Jacoby, L. L. (1996). Aging and memory: Implications for skilled performance.

Egger, M., Smith, G. D., Schneider, M. & Minder, C. (1997). Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. *The Bmj*, *315*(7109), 629-634.

Goble, D. J., Coxon, J. P., Van Impe, A., De Vos, J., Wenderoth, N. & Swinnen, S. P. (2010). The neural control of bimanual movements in the elderly: Brain regions exhibiting age-related increases in activity, frequency-induced neural modulation, and task-specific compensatory recruitment. *Human Brain Mapping*, *31*(8), 1281-1295.

Goble, D. J., Coxon, J. P., Wenderoth, N., Van Impe, A. & Swinnen, S. P. (2009). Proprioceptive sensibility in the elderly: degeneration, functional consequences and plastic-adaptive processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *33*(3), 271-278.

Good, C. D., Johnsrude, I. S., Ashburner, J., Henson, R. N., Friston, K. J. & Frackowiak, R. S. (2001). A voxel-based morphometric study of ageing in 465 normal adult human brains. *Neuroimage*, *14*(1 Pt 1), 21-36.

Gorniak, S. L. & Alberts, J. L. (2013). Effects of aging on force coordination in bimanual task performance. *Experimental Brain Research*, *229*(2), 273-284.

Grefkes, C., Eickhoff, S. B., Nowak, D. A., Dafotakis, M. & Fink, G. R. (2008). Dynamic intra- and interhemispheric interactions during unilateral and bilateral hand movements assessed with fMRI and DCM. *Neuroimage*, *41*(4), 1382-1394.

Heitger, M. H., Goble, D. J., Dhollander, T., Dupont, P., Caeyenberghs, K., Leemans, A., Sunaert, S. & Swinnen, S. P. (2013). Bimanual motor coordination in older adults is associated with increased functional brain connectivity-a graph-theoretical analysis. *PloS One*, *8*(4), e62133.

Herzog, R., Álvarez-Pasquin, M. J., Díaz, C., Del Barrio, J. L., Estrada, J. M., & Gil, Á. (2013). Are healthcare workers' intentions to vaccinate related to their knowledge, beliefs and attitudes? A systematic

review. *BMC Public Health*, *13*(1), 1-17.

Higgins, J. P. & Thompson, S. G. (2002). Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. *Statistics in Medicine*, *21*(11), 1539-1558.

Hsu, W. L., Chou, L. S. & Woollacott, M. (2013). Age-related changes in joint coordination during balance recovery. *Age (Dordr)*, *35*(4), 1299-1309.

Hu, X. & Newell, K. M. (2011). Aging, visual information, and adaptation to task asymmetry in bimanual force coordination. *Journal of Applied Physiology (1985)*, *111*(6), 1671-1680.

Jernigan, T. L., Archibald, S. L., Fennema-Notestine, C., Gamst, A. C., Stout, J. C., Bonner, J. & Hesselink, J. R. (2001). Effects of age on tissues and regions of the cerebrum and cerebellum. *Neurobiol Aging*, *22*(4), 581-594.

Jin, Y., Seong, J., Cho, Y. & Yoon, B. (2019). Effects of aging on motor control strategies during bimanual isometric force control. *Adaptive Behavior*, *27*(4), 267-275.

Kang, N., Roberts, L. M., Aziz, C. & Cauraugh, J. H. (2019). Age-related deficits in bilateral motor synergies and force coordination. *BMC Geriatrics*, *19*(1), 287.

Kantak, S., Jax, S. & Wittenberg, G. (2017). Bimanual coordination: A missing piece of arm rehabilitation after stroke. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *35*(4), 347-364.

Kelso, J., Scholz, J. & Schöner, G. (1988). Dynamics governs switching among patterns of coordination in biological movement. *Physics Letters A*, *134*(1), 8-12.

Kelso, J. A. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, *246*(6 Pt 2), R1000-R1004.

Kim, D. S., Choi, I. S. & Kim, S. Y. (2016). The impact of lower extremity strengthening exercise with step box and elastic band on balance ability and lower extremity muscular strength in community-living elderly individuals *Journal of the Korean Society of Physical Medicine*, *11*(1), 11-21.

Kim, S. J., Cho, S. R. & Yoo, G. E. (2017). Age-Related Changes in Bimanual Instrument Playing with Rhythmic Cueing. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1569.

Krehbiel, L. M., Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2017). Age-related differences in bimanual movements: A systematic review and meta-analysis. *Experimental Gerontology*, *98*, 199-206.

Leinen, P., Vieluf, S., Kennedy, D., Aschersleben, G., Shea, C. H. & Panzer, S. (2016). Life span changes: Performing a continuous 1:2 bimanual coordination task. *Human Movement Science*, *46*, 209-220.

Lin, C. H., Chou, L. W., Wei, S. H., Lieu, F. K., Chiang, S. L. & Sung, W. H. (2014). Influence of aging on bimanual coordination control. *Experimental Gerontology*, *53*, 40-47.

Maes, C., Gooijers, J., Orban de Xivry, J. J., Swinnen, S. P. & Boisgontier, M. P. (2017). Two hands, one brain, and aging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *75*, 234-256.

Magill, R. A. & Anderson, D. (2021). *Motor learning and control: concepts and applications* (Twelfth edition. ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

Mechsner, F., Kerzel, D., Knoblich, G. & Prinz, W. (2001). Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*, *414*(6859), 69-73.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. & Group, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Journal of Clinical Epidemiology*, *62*(10), 1006-1012.

Park, T. J. (2004). Conitive Neural Mechanisms of Aging. *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, *16*(3), 317-336.

Peper, C. & Carson, R. (1999). Bimanual coordination between isometric contractions and rhythmic movements: an asymmetric coupling. *Experimental Brain Research*, *129*(3), 417-432.

Peters, A. (2002). Structural changes that occur during normal aging of primate cerebral hemispheres. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *26*(7), 733-741.

Raz, N., Gunning, F. M., Head, D., Dupuis, J. H., McQuain, J., Briggs, S. D., Loken, W. J.,Thornton, A. E. & Acker, J. D. (1997). Selective aging of the human cerebral cortex observed *in vivo*: differential vulnerability of the prefrontal gray matter. *Cerebral Cortex*, *7*(3), 268-282.

Ren, J., Wu, Y. D., Chan, J. S. & Yan, J. H. (2013). Cognitive aging affects motor performance and learning. *Geriatrics & Gerontology International*, *13*(1), 19-27.

Resnick, S. M., Pham, D. L., Kraut, M. A., Zonderman, A. B. & Davatzikos, C. (2003). Longitudinal magnetic resonance imaging studies of older adults: a shrinking brain. *Journal of Neuroscience*, *23*(8), 3295-3301.

Rudisch, J., Müller, K., Kutz, D. F., Brich, L., Sleimen-Malkoun, R. & Voelcker-Rehage, C. (2020). How age, cognitive function and gender affect bimanual force control. *Frontiers in Physiology*, *11*, 245.

Ryu, J. (2021). Relationship between Strengths of the Lower Extremity's Joints and Their Local Dynamic Stability during Walking in Elderly Women. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *31*(1), 30-36.

Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., Kwak, Y. & Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neurosci Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*(5), 721-733.

Serrien, D. J. & Brown, P. (2002). The functional role of interhemispheric synchronization in the control of bimanual timing tasks. *Experimental Brain Research*, *147*(2), 268-272.

Shafizadeh, M., Sharifnezhad, A. & Wheat, J. (2019). Age-related changes to motor synergies in multi-joint and multi-finger manipulative skills: a meta-analysis. *European Journal of Applied Physiology*, *119*(10), 2349-2362.

Shih, P. C., Steele, C. J., Nikulin, V. V., Gundlach, C., Kruse, J., Villringer, A. & Sehm, B. (2021). Alpha and beta neural oscillations differentially reflect age-related differences in bilateral coordination. *Neurobiology of Aging*, *104*, 82-91.

Shin, E. (2013). Age-related neurocognitive changes and exercise-induced benefits: A review of cognitive neuroscientific research. *Korean Journal of Cognitive Science*, *24*(1), 1-24.

Sparrow, W. A., Parker, S., Lay, B. & Wengier, M. (2005). Aging effects on the metabolic and cognitive energy cost of interlimb coordination. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, *60*(3), 312-319.

Strong, R. (1998). Neurochemical changes in the aging human brain: implications for behavioral impairment and neurodegenerative disease. *Geriatrics*, *53 Suppl 1*, S9-12.

Sung, Y. J. & Moon, Y. J. (2020). Application and Effectiveness of the Two-Handed Exercise Duocock Program for Successful Aging: Bilateral Exercise. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *30*(1), 121-129.

Swinnen, S. P., Jardin, K., Meulenbroek, R., Dounskaia, N. & Den Brandt, M. H. (1997). Egocentric and allocentric constraints in the expression of patterns of interlimb coordination. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*(3), 348-377.

Swinnen, S. P. & Wenderoth, N. (2004). Two hands, one brain: cognitive neuroscience of bimanual skill. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(1), 18-25.

Temprado, J. J., Torre, M. M., Langeard, A., Julien-Vintrou, M., Devillers-Réolon, L., Sleimen-Malkoun, R. & Berton, E. (2020). Intentional switching between bimanual coordination patterns in older adults: Is it mediated by inhibition processes? *Frontiers in Aging Neuroscience*, *12*, 29.

Verdu, E., Ceballos, D., Vilches, J. J. & Navarro, X. (2000). Influence of aging on peripheral nerve function and regeneration. *Journal of the Peripheral Nervous System*, *5*(4), 191-208.

Vieluf, S., Godde, B., Reuter, E. M., Temprado, J. J. & Voelcker-Rehage, C. (2015). Practice effects in bimanual force control: does age matter? *Journal of Motor Behavior*, *47*(1), 57-72.

Wells, G. A., Shea, B., O'Connell, D., Peterson, J., Welch, V., Losos, M. & Tugwell, P. (2000). The Newcastle-Ottawa Scale (NOS) for assessing the quality of nonrandomised studies in meta-analyses. In: Oxford.

Woytowicz, E., Whitall, J. & Westlake, K. P. (2016). Age-related changes in bilateral upper extremity coordination. *Curr Current Geriatrics Reports*, *5*(3), 191-199.

Yang, J., Lee, W. H., Kang, K. S. & Kim, H. S. (2015). The Effect of the Fall Prevention Exercise Program Focussed on Strengthening of the Lower Extremity Muscles on the Change of Physical Function and Muscle Architecture of the Elderly. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, *16*(3), 1904-1919.

Zhu, Q., Mirich, T., Huang, S., Snapp-Childs, W. & Bingham, G. P. (2017). When kinesthetic information is neglected in learning a Novel bimanual rhythmic coordination. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *79*(6), 1830-1840.