KJAB
Korean Journal of Applied Biomechanics 2025; 35(1): 1-9
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2025.35.1.1
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

Effects of Visual Feedback on Bimanual Force Control Capabilities and Motor Unit Activation Patterns

시각 정보가 양손 힘 조절 능력 및 운동단위 활성 패턴에 미치는 영향

Hanall Lee[1,2,3*], Do-Kyung Ko[1,3*], Nyeonju Kang[1,2,3,4]

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

Received : 27 November 2024
Revised : 03 January 2025
Accepted : 03 January 2025

*These authors contributed equally as first authors

Corresponding Author
Nyeonju Kang
Neuromechanical Rehabilitation Research Laboratory/ Division of Sport Science/ Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 42101, South Korea
Email : nyunju@inu.ac.kr

Objective: The purpose of this study was to investigate effects of visual feedback on bimanual force control and motor unit discharge patterns in healthy young adults.

Method: Thirteen healthy young participants performed bimanual isometric force control tasks while recording decomposition electromyography data from both flexor digitorum profundus muscles under two visual conditions (vision and no-vision). To estimate force control capabilities, we used the relative root mean square error (rRMSE) and coefficient of variation (%CV). For motor unit activation patterns, mean and %CV of inter-spike intervals (ISI) were calculated. For statistical analysis, we conducted a paired *t*-test on rRMSE and two-way repeated measures ANOVAs (Vision condition × Hand dominant; 2 × 2) on force variability and motor unit activation patterns.

Results: When visual feedback was removed, force accuracy (rRMSE) decreased and force variability (%CV) increased. For motor unit activation patterns, there was no significant difference in mean ISI between vision conditions, whereas increased discharge variability (%CV ISI) was observed in no-vision condition as compared with vision condition.

Conclusion: These findings suggest that the absence of visual feedback interferes with bimanual force control capabilities and motor unit discharge patterns.

Keywords: Visual feedback, Force control, Motor unit, Upper extremities

INTRODUCTION

양손 힘 조절 능력은 일상생활 중 신체적 활동을 수행하는데 필요한 중요한 운동기능이다(Goble & Brown, 2008; Kim, Lee, Kang & Cauraugh, 2021; Szameitat, McNamara, Shen & Sterr, 2012). 양손 힘 조절 과제를 성공적으로 수행해 내기 위해서는 감각 정보를 활용하여 양손의 합력을 목표 힘 수준에 상응하도록 지속적으로 조절하는 감각운동통합 기능이 요구된다(Enoka & Duchateau, 2017; Johansson & Flanagan, 2009; Serrien, Ivry & Swinnen, 2006; Todorov & Jordan, 2002). 특히,

Copyright © 2025 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.

유기체, 환경, 과제 제약 조건은 힘 조절 능력에 영향을 미친다(Newell, 1991). 따라서 양손 힘 조절 능력을 평가하는 것은 외부 환경 변화와 내부 감각운동계 간 상호작용 능력을 평가하는 효과적인 방법이다(Kim et al., 2021; Lee, Lee, Kang & Cauraugh, 2022). 양손 힘 조절 능력을 평가하기 위한 주요 변인으로는 힘 정확성(force accuracy) 및 힘 가변성(force variability)이 있으며, 양손 힘 사이의 협응력을 측정하기도 한다(Christou & Enoka, 2011; Enoka et al., 2003; Oomen & van Dieën, 2017). 실제, 개인의 감각운동통합 기능이 저하된 뇌졸중 또는 파킨슨병 환자 경우 낮은 양손 힘 생성이 보고되었으며, 높은 목표 힘 수준에서 양손 힘 오차 및 가변성의 증가가 나타났다(Gorniak, Machado & Alberts, 2013; Kim et al., 2021). 또한 시각 정보를 제거하거나 시각 정보의 양을 조절하여 양손 힘 조절 변화를 측정할 수 있으며, 시각 정보 양을 제한될 경우 양손 힘 정확성이 저하되고 힘 가변성이 증가하는 경향이 나타났다(Kim et al., 2021; Lee et al., 2022).

양손 힘 조절 능력에 영향을 미치는 주된 요인으로는 주동근 내 근신경 활성화 패턴의 변화를 들 수 있다. 근신경 활성화 패턴 변화를 관찰하는 방법에는 경두개자기장(transcranial magnetic stimulation)을 통한 운동유발전위 측정, 근전도 및 특수 근전도를 사용한 운동단위의 활성 패턴을 분석하는 방법이 주로 사용된다(Heckman & Enoka, 2012; Malek & Coburn, 2012; Matsumoto & Ugawa, 2024). 특히, 운동단위는 힘 조절에 중요한 기본 요소로써(Heckman & Enoka, 2012), 특수화된 근전도를 통해 측정된 운동단위의 활성 패턴은 등척성 힘 조절 시 근신경 활동의 변화와 높은 연관성이 있는 것으로 보고되었다(De Luca, Foley & Erim, 1996). 운동단위 발화율(motor unit firing rate)은 알파운동뉴런의 활동 전위 빈도를 나타내며, 발화율의 증가는 높은 힘 생성과 연관이 있다(Heckman & Enoka, 2012). 운동단위 활성 패턴 변화에 영향을 미치는 내재적 요인에는 근피로 또는 노화가 있으며, 환경적 요인인 시각 정보도 운동단위 발화율 변화에 영향을 미칠 수 있다(Baweja, Kennedy, Vu, Vaillancourt & Christou, 2010). 시각-운동 신경경로의 활성화가 더욱 정밀한 운동 뉴런의 발화와 관련 있는 점을 고려하면(Jones, Hamilton & Wolpert, 2002; Sainburg, Ghilardi, Poizner & Ghez, 1995), 힘 조절 과제 중 실시간 시각 정보의 제공은 운동단위 발화율의 변화를 통해 발생되는 힘 오차를 빠르게 수정할 수 있다(Baweja et al., 2010). 실제, 한발 등쪽 굽힘 등척성 힘 조절 과제 시 움직임의 제어에 관여하는 시각 정보의 양이 증가되었을 때 더 높은 운동단위 평균 발화율이 관찰되었다(Kwon & Christou, 2018). 이러한 점은 정교한 움직임 발현과 오류 수정을 위해서는 보다 많은 신경 자원이 요구되는 것을 의미한다(Archer et al., 2018; Baweja, Patel, Martinkewiz, Vu & Christou, 2009; Hu, Loncharich & Newell, 2011; Sainburg et al., 1995).

현재까지 진행된 힘 조절 과제 시 근신경계의 활성 패턴 관련 연구는 편측 움직임에 집중되어 있었으며(Contessa, Adam & De Luca, 2009; Kornatz, Christou & Enoka, 2005; Park, Kwon, Solis, Lodha & Christou, 2016), 시각 정보 유·무에 따른 양측 힘 조절 시 운동단위 활성 패턴에 관한 연구는 부족한 실정이다. 또한 양측 움직임은 편측 움직임에 비해 뇌 반구 간 뇌량(corpus callosum)을 통해 보다 높은 수준의 신경적 상호작용이 요구되며, 좌우 반구 내 대뇌피질 활성화 및 신경 연결성(neural connectivity)이 필요하다(Lodha, Coombes & Cauraugh, 2012; Noble, Eng & Boyd, 2014; Nowak et al., 2007). 따라서 양손 힘을 생성하는데 있어 이러한 상위 수준에서 요구되는 신경적 자원이 직접적으로 관여하는 근신경계 조절 기전에 어떠한 영향을 미치는지를 조사할 필요가 있다. 더불어, 시각 정보가 양손 힘 조절 능력에 미치는 영향을 확인함으로써 시각적 피드백을 통한 양손 운동프로그램의 개발에 기초자료를 제공할 수 있다. 본 연구의 목적은 등척성 양손 힘 조절 과제 시 시각 정보 유·무에 따른 힘 조절 능력 및 운동단위 활성 패턴을 조사하는 데 있다. 시각 정보가 근신경계 조절 향상에 긍정적인 영향을 미치는 점을 미루어볼 때 양손 등척성 힘 조절 과제 시 시각 정보의 제거는 낮은 양손 힘 정확성과 높은 힘 가변성을 유발할 것이며, 이때 낮은 평균 발화 간격 및 높은 운동단위 발화 간격 가변성이 나타날 것으로 가설을 설정하였다(Baweja et al., 2010; Kim et al., 2021; Kwon & Christou, 2018).

METHODS

1. 연구 대상자 특성

본 연구의 표본 크기는 등척성 수축을 통한 운동단위 발화 패턴을 연구한 선행연구를 기반으로(Contessa et al., 2009), 근골격계 및 시력 손상이 없는 13명의 젊은 성인 참가자를 모집하였다(여성 5명과 남성 8명; 나이 = 25.6±2.6 years; 신장 = 171.5±5.9 cm, 체중 = 71.1±13.4 kg). 실험 전 24시간 동안 격렬한 신체 활동과 음주를 제한하고, 실험 전 12시간 동안 진통제 및 진정제와 같은 약물과 카페인 복용을 통제하였다(Lee, Lee, Lee, Ko & Kang, 2023). 모든 참가자는 오른손잡이였으며, 주로 사용하는 손은 Edinburgh Handedness Questionnaire로 평가하였다(Oldfield, 1971). 본 연구는 헬싱키 선언(Declaration of Helsinki)의 조항을 준수하여 진행하였으며, 인천대학교 기관생명윤리위원회(No. 7007971-202006-002A)에서 승인한 연구 프로토콜에 따라 수행하였다. 실험을 진행하기 전, 모든 연구 대상자들은 실험 과정에 대한 자세한 설명을 듣고 자발적 참여 의사를 확인한 후 동의서를 작성하였다.

Figure 1. Bimanual force control task. (A) Isometric hand-grip force measurement system. (B) Bimanual hand-grip force control position. (C) Vision and no-vision conditions.

2. 실험 도구

1) 등척성 힘 조절 장비

양손 힘 조절 능력을 평가하기 위해 힘 변환기(Micro Load Cell-CZL635- 3135, range = 220 lbs., Phidgets Inc., Calgary, AB, Canada)가 내장된 등척성 악력 측정 장비(isometric hand-grip force measurement system; SEED technology Inc., South Korea; Figure 1A)를 사용하였다. 모든 힘 신호는 16비트 아날로그-디지털 변환기(A/D; ADS1148 16-bit 2 kSPS, 최소 감지 가능한 힘 = 0.0192 N)를 사용하여 200 Hz로 수집하고, 5 V 여기 전압의 INA122 (Texas Instruments Inc., Dallas, TX, USA)를 사용하여 증폭하였다. 또한, Microsoft Visual C++ 프로그램(Microsoft Corp., Redmond, WA, USA)을 사용하여 개발된 소프트웨어를 통해 시각 정보를 제공하고 힘 신호를 수집하였다.

2) 특수화된 표면 근전도 장비

깊은 손가락 굽힘근(flexor digitorum profundus)은 먼쪽 손가락 관절까지의 굽힘 동작에 관여하며, 악력 과제에서 주동근으로 사용된다(Kaufmann, Kozin, Mirarchi, Holland & Porter, 2007; Shin & Lee, 2024; Shin, Lee & Lee, 2024). 따라서, 양손 힘 조절 과제 중 양측 깊은 손가락 굽힘근의 운동단위의 활동을 측정하기 위해 특수화된 근전도 장치(decomposition electromyography; dEMG; Figure 2A)를 사용하였다(De Luca, Adam, Wotiz, Gilmore & Nawab, 2006). 근전도 신호는 dEMG Galileo 센서가 있는 Delsys Trigno™ 시스템(Delsys, Natick, MA, USA)을 사용하여 2,222 Hz로 수집하였다(Priego-Quesada, Goethel, Becker, Fernandes & Vilas-Boas, 2022).

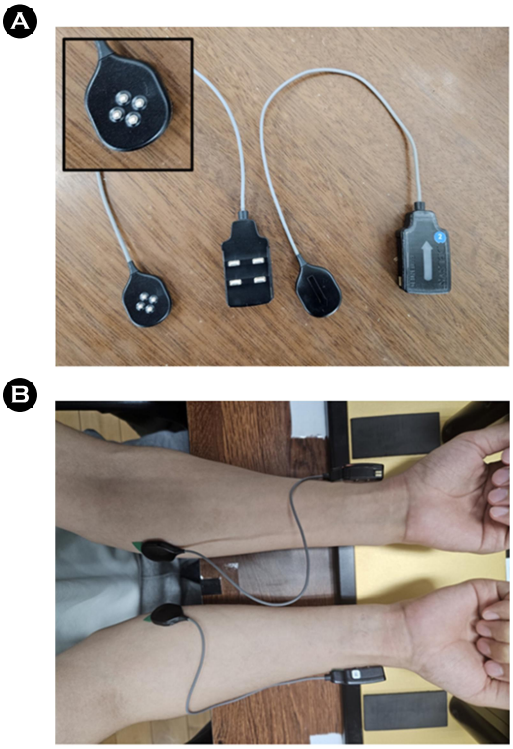

Figure 2. Measurement of motor unit activation patterns using the dEMG system. (A) dEMG devices and (B) Attachment location.

3. 실험 절차

양손 힘 조절 과제 중 운동단위의 활동을 측정하기 위한 근전도 부착을 하였다. 네 개의 핀이 내장된 표면 근전도 전극은 아래팔 안쪽위관절융기에서 먼쪽으로 8 cm 떨어진 아래팔 안쪽에 부착하였으며, 기준 전극은 노뼈 가쪽의 붓돌기

에서 몸쪽 방향으로 부착하였다(Garland & Miles, 1997). 또한, 근전도 전극을 부착하기에 전에 알코올로 부착위치의 피부 표면을 닦아 측정 시 발생하는 잡음(noise)을 최소화하였다(Figure 2B). 악력 측정 시 연구 대상자는 54.6 cm LCD 모니터(1,920 × 1,080 pixels; a refresh rate = 60 Hz)에서 80 cm 떨어진 곳에 앉아 양측 손잡이를 잡고 어깨관절 굽힘 15-20° 범위와 팔꿈치관절 굽힘 20-45° 범위의 편안한 자세로 과제를 수행하였다(Figure 1B; Ko & Kang, 2024; Lee et al., 2023; Lee et al., 2024). 힘 조절 과제를 시작하기에 앞서, 목표 힘 수준 설정을 위한 최대 자발적 수축력(maximum voluntary contraction; MVC) 측정을 진행하였다. MVC 측정은 각 3초 동안 총 2회에 걸쳐 수행하였으며, 두 번의 시도에서 측정된 양손 합력의 최대값에 대한 평균을 계산하여 각 대상자의 최대하 목표 힘 수준을 설정하였다. 또한, MVC 측정 간의 발생하는 피로를 최소화하기 위해 각 시도마다 1분의 휴식 시간을 제공하였다. 중간 힘 수준(30-50%MVC)에서 표면 근전도를 통한 악력 추정 정확성이 높다는 점을 감안하여, 각 피험자의 40%MVC를 최대하 목표 힘 수준으로 설정하였다(Hou et al., 2007). 양손 힘 조절 과제의 목표는 20초 동안 양손의 합력이 목표 힘 수준과 일치하도록 힘 출력을 조절하는 것이다. 두 종류의 시각 조건에 따라, Vision 조건에서는 20초 동안 양손의 합력과 목표 힘에 대한 실시간 시각 정보를 제공하였지만, No-vision 조건에서는 5초 후에 출력되는 힘에 대한 시각 정보를 제거하였다(Figure 1C). 각 시각 조건에서 한 번의 연습 후 10회의 측정을 진행하였으며, 시각 조건에 따른 과제의 순서는 무작위로 제공하였다. 또한 힘 조절 과제 중 피로에 따른 영향을 최소화하기 위해 시도 간 30초의 휴식과 시각 조건 사이의 1분의 휴식을 제공하였다.

4. 자료 분석

1) 양손 힘 조절 능력 평가

수집된 힘 데이터는 Matlab R2022a (Math Works™ Inc., Natick, United States)를 사용하여 분석하였다. 열 번의 시도 중, 운동단위 분석이 가능한 처음 3개의 시도에 대응하는 힘 데이터만을 분석하였다. 전처리 과정으로 힘 조절 시계열의 잡음을 제거하기 위해 양방향 4차 버터워스 필터(bidirectional fourth-order Butterworth filter)를 사용하여 30 Hz 차단 주파수로 저역통과(low-pass) 필터링하였다. 이후, 초기 조정 효과(initial adjustment effect)와 종료 효과(termination effect)를 고려하여 처음 5초와 마지막 1초의 구간을 제외한 중간 14초 구간을 분석에 사용하였다. 등척성 힘 조절 능력은 힘 정확성과 가변성으로 평가하였다. 힘 정확성은 상대 평균 제곱근 오차(relative Root Mean Square Error, rRMSE)를 사용하여 측정하였으며, 낮은 상대 평균 제곱근 오차는 높은 힘 정확성을 의미한다. 또한, 힘 가변성은 힘 조절 시계열의 변동계수(Coefficient of Variation, %CV)를 통해 평가하였으며(Ko & Kang, 2024), 낮은 변동계수는 낮은 힘 가변성을 나타낸다.

2) 운동단위 활성 패턴 분석

특수화된 근전도 신호의 분해는 NeuroMap System 소프트웨어(Delsys, Natick, MA, USA)를 사용하였다(Nawab, Chang & De Luca, 2010). 분해 알고리즘을 수행하기 전 네 개의 핀에서 수집된 각 아날로그 신호를 20 Hz의 차단 주파수로 고역통과 필터링 후 1,750 Hz의 차단 주파수로 저역 통과 필터링 하였으며(Nawab et al., 2010), 90% 정확도를 기준으로 근전도 신호 분해를 수행하였다(Hoshizaki, Clancy, Gabriel & Green, 2020). 근전도 신호 분해에 실패하는 경우가 발생함에 따라 양측 모두 신호 분해에 성공한 처음 3개의 시도만을 분석에 사용하였다. 근전도 신호 분해를 통해 각 운동단위의 활성화 시점이 기록된 시계열 데이터를 획득하였으며, Matlab R2022a (Math Works™ Inc., Natick, United States)를 사용하여 처음 5초와 마지막 1초의 구간을 제외한 중간 14초 구간을 분석하였다. 모든 운동단위의 활동을 종합적으로 평가하기 위해 개별 운동단위 발화 패턴을 시계열에 따라 통합하였다. 추후 통합 운동단위에 대한 발화 간격(inter-spike intervals, ISI)을 계산한 후, 평균 발화 간격(Mean ISI)과 발화 간격의 변동계수(%CV ISI)을 계산하여 운동단위 활성 패턴을 평가하였다(Chen, Lin, Lin, Hu & Hwang, 2017).

5. 통계 처리

시각 조건에 따른 힘 조절 정확성을 비교하기 위해, 상대 평균 제곱근 오차에 대한 대응 표본 *t*-검정을 실시하였다. 또한 두 시각 조건에서 각 손에 대한 힘 가변성 및 운동단위 활성 패턴을 평가하기 위해 이원 반복측정 분산 분석(two-way repeated measures ANOVA; Vision condition × Hand; 2 × 2)을 수행하였다. 통계적 유의성이 확인되었을 경우, Bonferroni pairwise comparison을 통해 사후검정을 실시하였다. 모든 통계 분석은 IBM SPSS Statistics 25 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하여 수행되었으며, 유의 수준은 .05로 설정하였다.

RESULTS

1. 양손 힘 조절 능력

상대 평균 제곱근 오차(rRMSE)에 대한 대응 표본 *t*-검정 결

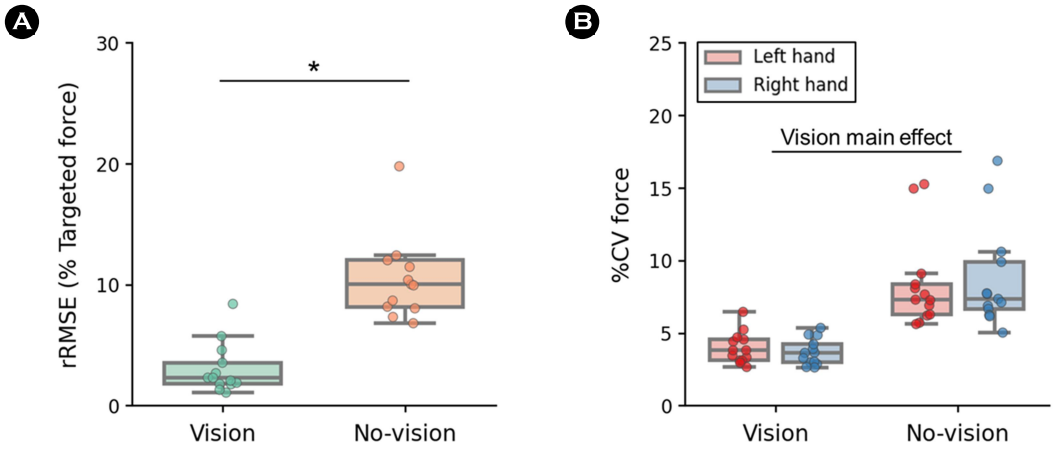

Figure 3. Bimanual force control performance for vision and no-vision conditions. (A) Bimanual force control accuracy showing a significant Vision condition difference (*indicates p < .05). (B) Bimanual force control variability showing a significant Vision condition main effect (p < .05).

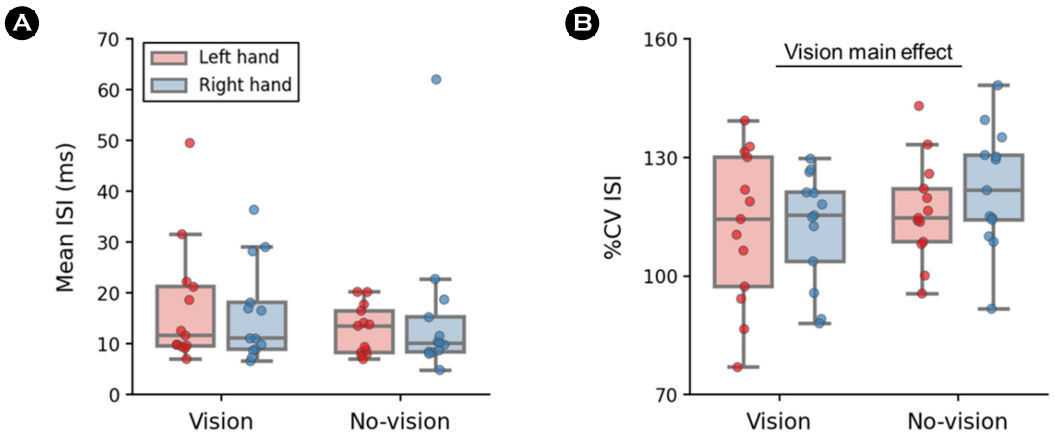

Figure 4. Motor unit discharge patterns during bimanual force control task at two vision conditions. (A) Mean inter-spike intervals showing no significant effects. (B) %CV of inter-spike intervals showing a significant Vision condition main effect (p < .05).

과, 힘 정확성은 시각 정보가 제거됨에 따라 감소하였다(t_{35} = -9.594; p < .001; Figure 3A). 또한, 힘 조절 변동계수(%CV force)에 대한 이원 반복측정 분산 분석에서 시각 조건 주효과가 발견되었으며[F(1, 12) = 40.733; p < .001; partial η^2 = 0.772; Figure 3B], 시각 정보가 제거 시 힘 가변성이 증가하였다.

2. 운동단위 활성 패턴

운동단위의 평균 발화 간격(mean ISI)에 대한 이원 반복측정 분산 분석 결과, 유의한 차이가 발견되지 않았다[F(1, 12) = 0.455; p = .513; partial η^2 = 0.037; Figure 4A]. 반면에, 운동단위 발화 간격 변동계수(%CV ISI)에 대한 이원 반복측정 분산 분석 결과, 시각 조건 주효과가 나타났으며[F(1, 12) = 7.788; p = .016; partial η^2 = 0.394; Figure 4B], 시각 정보가 제거 시 발화 가변성이 유의하게 증가하였다.

DISCUSSION

양손 등척성 힘 조절 과제 수행 시 시각 정보의 제거는 힘 정확성 감소 및 힘 가변성 증가로 이어졌다. 이는 기존 선행 연구들의 보고와 일치하는 결과이며, 시각 정보가 전반적인 양손 힘 조절 능력에 있어 과제 수행력(task performance)에 기여하는 것을 의미한다(Archer et al., 2018; Hu et al., 2011;

Satas, Jurgelaitiene, Brazaitis, Eimantas & Skurvydas, 2020; Tracy, Dinenno, Jorgensen & Welsh, 2007). 일반적으로 시각 정보가 제공될 때 운동시스템 내 시각-운동 네트워크(visuo-motor processing network)가 활성화가 된다(Aoki, Fetz, Shupe, Lettich & Ojemann, 2001; Ledberg, Bressler, Ding, Coppola & Nakamura, 2007). 특히 등척성 힘 조절 시 실시간 시각 정보의 제공은 두정피질(parietal cortex) 및 전운동피질(pre-motor cortex)을 활성화시켜 시각 정보 처리를 통한 정확한 움직임 생성에 기여할 수 있다(Vaillancourt, Mayka & Corcos, 2006). 추가적으로 시각 정보의 제공은 소뇌의 활성화 수준을 증가시키는 것으로 관찰이 되었다(Vaillancourt et al., 2006; Vaillancourt, Thulborn & Corcos, 2003). 소뇌가 움직임 수정 및 움직임 출력의 미세 조정에 관여하는 영역임을 고려하면, 시각 정보 제공에 따른 소뇌의 활성화가 정확한 움직임 생성에 중요하게 관여될 수 있음을 의미한다(Manto et al., 2012). 따라서 양손 힘 조절 시 시각 정보의 제공은 실시간 시각 정보 처리를 통해 정확한 움직임으로 이어질 수 있으며 보다 안정적이고 정밀한 힘 조절 능력 수행에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다(Vaillancourt et al., 2006; Vaillancourt et al., 2003).

운동단위 발화 패턴인 평균 발화 간격에서 시각 정보의 유무에 따른 유의한 차이가 발견이 되지 않았다. 등척성 힘 조절 과제에서 시각 정보가 제거될 경우 목표 힘 수준에 상응하는 지속적인 힘을 생성하기 위해 고유수용감각을 활용하여 일정한 힘 출력을 유지해야 한다. 일정한 수준의 힘을 출력함에 있어 운동단위 간 발화 패턴을 일관적으로 유지시키려는 운동시스템의 전략으로 인해 시각 정보가 제공되었을 때와 유사한 발화 간격이 관찰된 것으로 사료된다(De Luca & Erim, 2002; Dideriksen, Farina & Enoka, 2010; Proske & Gandevia, 2012). 반면, 시각 정보가 제거된 경우 양손 모두 운동단위 발화 간격 가변성이 증가되는 결과를 보였다. 이는 시각 정보의 제거로 인해 중추신경 내에서 안정되고 일관된 움직임을 생성하기 위해 요구되는 실시간 시각-운동 수정(online visuomotor correction)이 제대로 이루어지지 않은 것과 관련이 있을 수 있다. 선행연구에서는 감각 피드백이 제거되거나 부족할 때 오류 수정 과정 및 안정된 움직임에 요구되는 운동단위 발화 패턴 조절 능력의 저하로 이어짐을 보고하였다(Limonta, Rampichini, Cè & Esposito, 2015; Satas et al., 2020; Tracy, Maluf, Stephenson, Hunter & Enoka, 2005). 또한 등척성 힘 조절 과제 시 시각 정보가 제거될 경우 시각-운동 정보 처리와 연관된 뇌 영역인 시각피질(visual cortex), 두정피질(parietal cortex), 및 소뇌(cerebellum) 영역의 감소된 신경 활성도를 보였으며, 힘 조절 가변성이 증가되었다(Vaillancourt et al., 2006). 이러한 결과로 볼 때 시각 정보의 제거가 안정적인 힘 생성을 위해 필요한 중추신경 자원의 부족을 유발시킬 수 있음을 의미하며, 나아가 말초신경계의 활동에도 부정적인 영향을 유발한 것으로 생각된다(Jones et al., 2002; Kwon & Christou, 2018; Satas et al., 2020).

반면, 시각 정보의 유·무는 양손 내 힘 조절 및 운동단위 발화 패턴의 차이를 유발시키지는 않았다. 실제로 등척성 양측 손등 폄 힘 조절 과제(bilateral wrist flexion force control task) 시 시각 정보를 제거했을 경우 감소된 힘 정확성 및 증가된 가변성이 관찰되었으며, 양손 간 유의한 차이는 발견되지 않았다(Kim et al., 2021). 이러한 결과는 양측 움직임에 의해 좌·우 반구 내 운동피질이 동시에 활성화를 이루며 양손 간 근육 활성 패턴의 동기화가 발생할 수 있음을 의미한다(Serrien et al., 2006). 실제 양손 협응 과제에서 뇌량 및 좌·우 반구 내 운동피질, 보조운동영역 및 전운동피질의 활성화가 관찰이 되었다(Serrien et al., 2006). 이는 양손 등척성 힘 조절 시 뇌 반구 간 기능적 연결성(functional connectivity)이 강화됨을 의미하며, 양손 간 근육 활성 패턴의 동기화를 유발하여 좌·우 가변성의 차이를 줄이는데 관여하는 것으로 사료된다(Debaere, Wenderoth, Sunaert, Van Hecke & Swinnen, 2004; Diedrichsen, Hazeltine, Nurss & Ivry, 2003). 추가적으로 주손 및 비주손 간 평균 발화의 차이가 발생하지 않은 점을 고려해 볼 때 양손 등척성 힘 조절 시 동일한 힘을 내기 위한 비슷한 특성을 가진 운동단위가 동원되었을 것이라 사료된다(De Luca et al., 1996; Heckman & Enoka, 2012). 또한 본 연구에서 진행된 양손 등척성 힘 조절 과제는 건강한 성인에게는 비교적 쉬운 난이도의 운동과제가 될 수 있다. 이로 인한 천장 효과(ceiling effect)로 주손 및 비주손 간 힘 가변성, 운동단위 발화 패턴 차이가 나타나지 않았을 수 있다. 실제, 동일한 양손 힘 조절 과제 시 젊은 성인 집단은 노인 집단에 비해 우수한 힘 대칭성을 보였다(Galofaro, Valè, Ballardini, Smania & Casadio, 2022). 이러한 결과들을 고려해 볼 때 양손 힘 조절 과제 시 건강한 성인은 지속적이며 효율적인 힘 생성을 위해 양손 간 발화 패턴을 유사하게 동기화하려는 것으로 사료된다.

CONCLUSION

양손 등척성 힘 조절 과제 시 시각 정보의 유·무에 따라 힘 조절 능력 및 특수화된 표면 근전도를 통해 운동단위 활성 패턴의 변화를 확인하였다. 본 연구의 결과, 양손 모두 시각 정보 제거 시 낮은 힘 정확성, 높은 힘 가변성 및 증가된 운동단위 발화 패턴의 가변성을 보였다. 이러한 연구 결과는 시각 정보의 유·무가 힘 조절 능력 및 운동단위 활성 패턴에 양손 모두 영향을 주고 있음을 의미한다. 이러한 힘 조절 능력 및 운동단위 활성 패턴은 환경적(task constraint) 요인 외에도 개인(individual organism constraint) 및 과제(task constraint)에 따라 변화할 수 있으며, 이러한 제약(constraint)

의 변화에 따른 잠정적 영향을 확인할 수 있는 추후 연구가 필요할 것이다. 이러한 결과에도 불구하고, 본 연구의 제한점은 다음과 같다. 첫째, 고정된 힘 수준(i.e., 40%MVC)에서 본 연구가 진행되었으며, 실시간으로 증가 또는 감소되는 목표 힘 수준에서의 변화는 고려가 되지 않았다. 힘 수준에 따른 힘 조절 능력 및 운동단위 활성 패턴의 변화가 발생할 수 있음을 선행연구를 통해 비춰볼 때 추후 연구에는 유동적인 목표 힘 수준에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 될 것이다. 둘째, 본 연구는 시각 정보의 유·무 조건에 따른 변화된 결과만 제공하였기 때문에, 시각 정보 양의 변화를 통한 힘 조절 능력 및 운동단위 활성 패턴의 변화에 대한 추가적인 연구를 고려해 볼 수 있다. 마지막으로, 본 연구의 결과는 건강한 성인으로 한정이 되어있기 때문에 노인 또는 신경병변 환자군에 대한 추후 연구가 필요하다고 사료된다.

REFERENCES

Aoki, F., Fetz, E. E., Shupe, L., Lettich, E. & Ojemann, G. A. (2001). Changes in power and coherence of brain activity in human sensorimotor cortex during performance of visuomotor tasks. *Biosystems*, *63*(1-3), 89-99.

Archer, D. B., Kang, N., Misra, G., Marble, S., Patten, C. & Coombes, S. A. (2018). Visual feedback alters force control and functional activity in the visuomotor network after stroke. *Neuroimage Clinical*, *17*, 505-517.

Baweja, H. S., Kennedy, D. M., Vu, J., Vaillancourt, D. E. & Christou, E. A. (2010). Greater amount of visual feedback decreases force variability by reducing force oscillations from 0-1 and 3-7 Hz. *European Journal of Applied Physiology*, *108*(5), 935-943.

Baweja, H. S., Patel, B. K., Martinkewiz, J. D., Vu, J. & Christou, E. A. (2009). Removal of visual feedback alters muscle activity and reduces force variability during constant isometric contractions. *Experimental Brain Research*, *197*(1), 35-47.

Chen, Y. C., Lin, L. L., Lin, Y. T., Hu, C. L. & Hwang, I. S. (2017). Variations in static force control and motor unit behavior with error amplification feedback in the elderly. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 538.

Christou, E. A. & Enoka, R. M. (2011). Aging and movement errors when lifting and lowering light loads. *Age (Dordrecht, Netherlands)*, *33*(3), 393-407.

Contessa, P., Adam, A. & De Luca, C. J. (2009). Motor unit control and force fluctuation during fatigue. *Journal of Applied Physiology*, *107*(1), 235-243.

De Luca, C. J., Adam, A., Wotiz, R., Gilmore, L. D. & Nawab, S. H. (2006). Decomposition of surface EMG signals. *Journal of Neurophysiology*, *96*(3), 1646-1657.

De Luca, C. J. & Erim, Z. (2002). Common drive in motor units of a synergistic muscle pair. *Journal of Neurophysiology*, *87*(4), 2200-2204.

De Luca, C. J., Foley, P. J. & Erim, Z. (1996). Motor unit control properties in constant-force isometric contractions. *Journal of Neurophysiology*, *76*(3), 1503-1516.

Debaere, F., Wenderoth, N., Sunaert, S., Van Hecke, P. & Swinnen, S. P. (2004). Changes in brain activation during the acquisition of a new bimanual coodination task. *Neuropsychologia*, *42*(7), 855-867.

Dideriksen, J. L., Farina, D. & Enoka, R. M. (2010). Influence of fatigue on the simulated relation between the amplitude of the surface electromyogram and muscle force. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, *368*(1920), 2765-2781.

Diedrichsen, J., Hazeltine, E., Nurss, W. K. & Ivry, R. B. (2003). The role of the corpus callosum in the coupling of bimanual isometric force pulses. *Journal of Neurophysiology*, *90*(4), 2409-2418. doi:10.1152/jn.00250.2003

Enoka, R. M., Christou, E. A., Hunter, S. K., Kornatz, K. W., Semmler, J. G., Taylor, A. M. & Tracy, B. L. (2003). Mechanisms that contribute to differences in motor performance between young and old adults. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *13*(1), 1-12.

Enoka, R. M. & Duchateau, J. (2017). Rate coding and the control of muscle force. *Cold Spring Harbor Perspectives Medicine*, *7*(10).

Galofaro, E., Valè, N., Ballardini, G., Smania, N. & Casadio, M. (2022). Bimanual isometric force control in young and older adults. *Research Square*, Preprint.

Garland, S. J. & Miles, T. S. (1997). Control of motor units in human flexor digitorum profundus under different proprioceptive conditions. *The Journal of Physiology*, *502*(3), 693-701.

Goble, D. J. & Brown, S. H. (2008). The biological and behavioral basis of upper limb asymmetries in sensorimotor performance. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *32*(3), 598-610.

Gorniak, S. L., Machado, A. G. & Alberts, J. L. (2013). Force coordination during bimanual task performance in Parkinson's disease. *Experimental Brain Research*, *229*(2), 261-271.

Heckman, C. J. & Enoka, R. M. (2012). Motor unit. *Compre-*

hensive Physiology, *2*(4), 2629-2682.

Hoshizaki, T., Clancy, E. A., Gabriel, D. A. & Green, L. A. (2020). The reliability of surface EMG derived motor unit variables. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *52*, 102419.

Hou, W., Jiang, Y., Zheng, J., Zheng, X., Peng, C. & Xu, R. (2007). Handgrip force estimation based on a method using surface electromyography (sEMG) of extensor carpi radialis longus. *In 2007/IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 1229-1235.

Hu, X., Loncharich, M. & Newell, K. M. (2011). Visual information interacts with neuromuscular factors in the coordination of bimanual isometric force. *Experimental Brain Research*, *209*(1), 129-138.

Johansson, R. S. & Flanagan, J. R. (2009). Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks. Nature Reviews. *Neuroscience*, *10*(5), 345-359.

Jones, K. E., Hamilton, A. F. & Wolpert, D. M. (2002). Sources of signal-dependent noise during isometric force production. *Journal of Neurophysiology*, *88*(3), 1533-1544.

Kaufmann, R. A., Kozin, S. H., Mirarchi, A., Holland, B. & Porter, S. (2007). Biomechanical analysis of flexor digitorum profundus and superficialis in grip-strength generation. *American Journal of Orthopedics (Belle Mead, NJ)*, *36*(9), E128-132.

Kim, H., Lee, J., Kang, N. & Cauraugh, J. (2021). Visual feedback improves bimanual force control performances at planning and execution levels. *Scientific Reports*, *11*(1), 21149-21149.

Ko, D. K. & Kang, N. (2024). Aging impairs unimanual and bimanual hand-grip force control capabilities. *Applied Sciences*, *14*(11), 4408.

Kornatz, K. W., Christou, E. A. & Enoka, R. M. (2005). Practice reduces motor unit discharge variability in a hand muscle and improves manual dexterity in old adults. *Journal of Applied Physiology*, *98*(6), 2072-2080.

Kwon, M. & Christou, E. A. (2018). Visual information processing in older adults: reaction time and motor unit pool modulation. *Journal of Neurophysiology*, *120*(5), 2630-2639.

Ledberg, A., Bressler, S. L., Ding, M., Coppola, R. & Nakamura, R. (2007). Large-scale visuomotor integration in the cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, *17*(1), 44-62.

Lee, H., Lee, J. H., Lee, T. L., Ko, D. K. & Kang, N. (2023). Dual-hemisphere anodal transcranial direct current stimulation improves bilateral motor synergies. *Frontiers in Psychology*, *14*, 1211034.

Lee, J. H., Lee, H., Kim, H., Kim, R. K., Lee, T. L., Ko, D. K., Lee, H. & Kang, N. (2024). Resistance band training with functional electrical stimulation improves force control capabilities in older adults: a preliminary study. *EXCLI Journal*, *23*, 130.

Lee, T. L., Lee, H., Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2022). Higher visual gain contributions to bilateral motor synergies and force control. *Scientific Reports*, *12*(1), 18271.

Limonta, E., Rampichini, S., Cè, E. & Esposito, F. (2015). Effects of visual feedback absence on force control during isometric contraction. *European Journal of Applied Physiology*, *115*(3), 507-519.

Lodha, N., Coombes, S. A. & Cauraugh, J. H. (2012). Bimanual isometric force control: asymmetry and coordination evidence post stroke. *Clinical Neurophysiology*, *123*(4), 787-795.

Malek, M. H. & Coburn, J. W. (2012). The utility of electromyography and mechanomyography for assessing neuromuscular function: a noninvasive approach. *Physical Medicine Rehabilitation Clinics of North America*, *23*(1), 23-ix.

Manto, M., Bower, J. M., Conforto, A. B., Delgado-García, J. M., da Guarda, S. N., Gerwig, M., Habas, C., Hagura, N., Ivry, R. B., Mariën, P., Molinari, M., Naito, E., Nowak, D. A., Oulad Ben Taib, N., Pelisson, D., Tesche, C. D., Tilikete, C. & Timmann, D. (2012). Consensus paper: roles of the cerebellum in motor control--the diversity of ideas on cerebellar involvement in movement. *Cerebellum*, *11*(2), 457-487.

Matsumoto, H. & Ugawa, Y. (2024). Central and peripheral motor conduction studies by single-pulse magnetic stimulation. *Journal of Clinical Neurology*, *20*(3), 241-255.

Nawab, S. H., Chang, S. S. & De Luca, C. J. (2010). High-yield decomposition of surface EMG signals. *Clinical Neurophysiology*, *121*(10), 1602-1615.

Newell, K. M. (1991). Motor skill acquisition. *Annual Review of Psychology*, *42*(1), 213-237.

Noble, J. W., Eng, J. J. & Boyd, L. A. (2014). Bilateral motor tasks involve more brain regions and higher neural activation than unilateral tasks: an fMRI study. *Experimental Brain Research*, *232*(9), 2785-2795.

Nowak, D. A., Grefkes, C., Dafotakis, M., Küst, J., Karbe, H. & Fink, G. R. (2007). Dexterity is impaired at both hands following unilateral subcortical middle cerebral artery

stroke. *European Journal of Neuroscience*, *25*(10), 3173-3184.

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113.

Oomen, N. M. & van Dieën, J. H. (2017). Effects of age on force steadiness: a literature review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, *35*, 312-321.

Park, S. H., Kwon, M., Solis, D., Lodha, N. & Christou, E. A. (2016). Motor control differs for increasing and releasing force. *Journal of Neurophysiology*, *115*(6), 2924-2930.

Priego-Quesada, J. I., Goethel, M. F., Becker, K. M., Fernandes, R. J. & Vilas-Boas, J. P. (2022). How to work with electromyography decomposition in practical classes of exercise physiology and biomechanics. *Life (Basel, Switzerland)*, *12*(4), 483.

Proske, U. & Gandevia, S. C. (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews*, *92*(4), 1651-1697.

Sainburg, R. L., Ghilardi, M. F., Poizner, H. & Ghez, C. (1995). Control of limb dynamics in normal subjects and patients without proprioception. *Journal of Neurophysiology*, *73*(2), 820-835.

Satas, A., Jurgelaitiene, G., Brazaitis, M., Eimantas, N. & Skurvydas, A. (2020). Effect of knee extensors muscles fatigue on bilateral force accuracy, variability, and coordination. *Human Movment Science*, *72*, 102659.

Serrien, D. J., Ivry, R. B. & Swinnen, S. P. (2006). Dynamics of hemispheric specialization and integration in the context of motor control. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*(2), 160-166.

Shin, Y. & Lee, M. (2024). Development and evaluation of a grip strength reflection system based on SEMG of the flexor digitorum profundus for sensory VR interaction. *Journal of Korea Multimedia Society*, *27*(3), 436-444.

Shin, Y., Lee, M. J. & Lee, M. (2024). Improvement of VR interface that reflects user's grip strength. *Proceeding in Korea Computer Graphics Society Conference*, 94-96.

Szameitat, A. J., McNamara, A., Shen, S. & Sterr, A. (2012). Neural activation and functional connectivity during motor imagery of bimanual everyday actions. *PLoS One*, *7*(6), e38506.

Todorov, E. & Jordan, M. I. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, *5*(11), 1226-1235.

Tracy, B. L., Dinenno, D. V., Jorgensen, B. & Welsh, S. J. (2007). Aging, visuomotor correction, and force fluctuations in large muscles. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(3), 469-479.

Tracy, B. L., Maluf, K. S., Stephenson, J. L., Hunter, S. K. & Enoka, R. M. (2005). Variability of motor unit discharge and force fluctuations across a range of muscle forces in older adults. *Muscle Nerve*, *32*(4), 533-540.

Vaillancourt, D. E., Mayka, M. A. & Corcos, D. M. (2006). Intermittent visuomotor processing in the human cerebellum, parietal cortex, and premotor cortex. *Journal of Neurophysiology*, *95*(2), 922-931.

Vaillancourt, D. E., Thulborn, K. R. & Corcos, D. M. (2003). Neural basis for the processes that underlie visually guided and internally guided force control in humans. *Journal of Neurophysiology*, *90*(5), 3330-3340.