KJAB
Korean Journal of Applied Biomechanics 2024; 34(4): 165-175
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2024.34.4.165
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

The Effect of Inertial Load of Water on Lower Muscle Activation and COP (Center of Pressure) during Single-leg Landing Accompanied by Trunk Rotation

물의 관성 부하가 몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 시 하지의 근 활성도 및 COP에 미치는 영향

Ja Yeon Lee, Chae Kwan Lee

Department of Sports Rehabilitation, Busan University of Foreign Studies, Busan, South Korea

Received : 06 September 2024
Revised : 03 November 2024
Accepted : 03 November 2024

Corresponding Author
Chae Kwan Lee
Department of Sports Rehabilitation, Busan University of Foreign Studies, 65, Geumsaem-ro 485beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46234, South Korea

Email : 20246001@bufs.ac.kr

Objective: The purpose of this study is to compare and analyze the muscle activation and COP (Center of Pressure) values when single-leg landing with trunk rotation while wearing a Waterbag vest versus a Weight vest. Electromyography (EMG) was used to measure and analyze muscle activation, while a force platform was used to measure and analyze COP values.

Method: This study involved 24 male university students from University B (age: 21.9 ± 1.5 years, height: 177.0 ± 4.7 cm, weight: 76.1 ± 8.2 kg). Subjects with musculoskeletal injuries were excluded from the study.

Results: EMG analysis of seven measured muscles showed significant differences in the Gluteus Medius and the Rectus Femoris when wearing the Waterbag vest. COP values showed significant differences in the anteroposterior (AP) range and displacement, velocity, mediolateral (ML) root mean square (RMS), and anteroposterior-mediolateral (APML) displacement and velocity.

Conclusion: Significant differences were observed in the Gluteus Medius and Rectus Femoris among the seven measured muscles, and COP values differed significantly in AP range and displacement, velocity, ML RMS, and APML displacement and velocity. The results suggest that the instability caused by the water's inertial load temporarily increases stability due to the simultaneous contraction of the Gluteus Medius and Rectus Femoris, thereby reducing COP values. This indicates that the inertial load of water may contribute to neuromuscular enhancement.

Keywords: Single leg landing, Trunk rotation, Inertial load of water, Co-contraction

INTRODUCTION

착지 동작은 스포츠 활동의 맥락에서 인간에게 필수적인 과제이며, 대부분의 스포츠는 다양한 높이에서 한 발로 효과적으로 착지하기 위한 능력이 요구된다(Waldén et al., 2015). 이러한 착지 동작은 지면과의 충돌 시 운동 에너지를 만들기

Copyright © 2024 Korean Journal of Applied Biomechanics
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

위해 하지에 부담을 주게 되는데, 효과적인 에너지를 만들지 못하면 인대나 연골과 같은 취약한 조직에 높은 부담이 가해져 손상과 부상의 위험에 노출될 수 있다(Yeow, Lee & Goh, 2009). 이와 관련하여 양 다리 착지에 있어 착지 시 비접촉으로 인한 ACL (Anterior Cruciate ligament) 부상과 관련된 연구(Nagano, Ida, Akai & Fukubayashi, 2007), 방향에 따른 착지 시 발목 관절과 무릎 관절의 부상에 대한 연구(Cho, Kim, Moon, Cho & Lee, 2010)들과 같이 많은 연구들이 진행되었지만, 한 다리 착지와 관련된 연구는 부족할 뿐만 아니라 부상의 발생률이 더 높아(Ali, Robertson & Rouhi, 2014) 주목할 필요가 있다고 사료된다.

몸통은 착지 시 지면 반력에 많은 영향을 주며(Lees, 1981), 착지 중 몸통의 움직임은 신체 전체의 질량 중심의 위치에 영향을 미치고 무릎에 가해지는 부하를 증가시킨다. 특히 몸통의 움직임이 신체의 무게 중심에 영향을 미치게 되면 하지에 의해 균형을 맞춰야 하며, 이는 착지 메커니즘에 영향을 미칠 수 있다(Davis, Hinshaw, Critchley & Dai, 2019).

착지 시 지지하고 있는 다리 쪽으로 몸통이 기울어지거나 회전하는 것은 운동 중 무릎의 외전 모멘트(Knee abduction moment)를 증가시켜 ACL 부상의 위험률을 높인다(Chijimatsu et al., 2020; Critchley et al., 2019; Taniguchi et al., 2022). 또, Farì et al. (2022)는 농구 선수들의 점프 후 착지 단계에서 하지가 더 높은 부하를 받는다고 하였으며, Meng et al. (2022)는 착지 동작에서 발목 관절이 몸통의 기울임으로 인해 내측으로 회전하며 부상의 위험률이 높다고 하였다. 이와 같은 선행 연구를 통해 다양한 스포츠 종목에서 몸통의 회전이 착지와 동반되는 경우 하지의 부상 위험도가 높아진다는 것을 알 수 있다.

Lee, Lin, Wu, Wu & Lin (2012)에 따르면, 안전하고 부드러운 착지를 위해서는 충격에 대비할 수 있는 근육의 활동이 필요하며, 착지 후 증가된 근육 활동은 충격력을 흡수하고 신체 전체를 안정시키는 역할을 한다. 특히 하지 근육의 활성화는 착지 시 신체를 부상으로부터 보호하는 데 중요한 역할을 하며(Niu, Wang, He, Fan & Zhao, 2010, 2011; Niu et al., 2011), 착지 시 몸통 위치의 급격한 변화에 대응하기 위한 고유수용성 감각과 운동 반응과도 밀접한 관계가 있다(Zazulak, Hewett, Reeves, Goldberg & Cholewicki, 2007). 따라서 착지 시 발생하는 다양한 부담을 해결하기 위해 근육의 활성화와 변화를 조절하는 통합적인 신경근 훈련이 필요하다고 사료된다. 그래서 외부 동요(perturbation)를 통한 훈련이 적합하다고 판단된다.

외부 동요는 인체의 신경근 시스템을 매우 높은 수준으로 활성화시켜 운동 과제를 적절하게 수행할 수 있도록 하는 훈련 방법이다(Munoz-Martel, Santuz, Bohm & Arampatzis, 2021). Wezenbeek et al. (2022)은 최근 많은 지도자가 다이나믹 관점과 생태학적 접근법에 기초하여 워터백을 이용한 훈련을 현장에서 적용하고 있다고 하였으며, 스쿼트, 런지, 스텝업 3가지 기능적 운동을 하는 동안 워터백과 나무 스틱을 비교하여 몸통과 하지 근육의 근 활성도에 미치는 영향을 조사한 결과, 워터백을 적용한 그룹에서 복부와 엉덩이 근육의 활성도가 크게 나타난 것으로 보고하였다. Calatayud et al. (2015)은 클린 앤 저크(Clean & Jerk) 동작에서 일반 바벨과 워터백, 그리고 샌드백 사용에 관한 비교 연구에서 워터백 사용이 몸통 근육을 높게 활성화시킨 것으로 보고하였다. 국내에서는 Kang, Lee & Park (2023)이 배드민턴 선수들의 런지(Lunge) 자세에서 착지 동작 시 워터백 조끼(waterbag vest)를 착용한 그룹에서 넙다리곧은근과 햄스트링의 근 활성도를 높여 무릎의 안정성에 기여할 수 있는 것으로 보고하였고, Kang, Jo & Park (2024)은 만성적 발목 불안정성(CAI)을 가진 축구 동호인들에게 물의 관성 부하 훈련이 미치는 효과를 조사한 결과, 물의 관성 부하 훈련 이후 드롭 랜딩(drop landing) 시 COP (center of pressure) 값이 감소함으로써 활발해진 신경근 활성이 발목의 안정화에 기여하였다고 보고하였다. 또한, Lee & Kang (2023)은 펜싱 선수들의 팡트(Fente) 동작에서 워터백 조끼를 착용한 그룹이 하지와 몸통의 근 활성도를 증가시켰기에 워터백은 긍정적인 효과를 나타낸 것으로 보고하였다. 이와 같이 선행 연구에서는 외부 동요를 활용한 훈련 도구로써 물의 관성 부하(inertial load of water)를 이용한 워터백을 사용하였다.

워터백은 튜브에 물을 채워 불안정성을 만들어내는 훈련 도구이며, 움직임에 따라 물이 흔들리면서 물의 관성 부하를 제공해준다(Wezenbeek et al., 2022). 물의 관성 부하는 다양하게 변화하는 속도, 방향 때문에 더욱 불안정한 외부 동요의 요소이다. 따라서 워터백은 몸통 회전을 동반한 착지 시 급격한 변화에 대응하기 위한 도구로 적합할 것으로 판단된다.

근육의 협응을 정량화하는 방법 중 하나는 표면 근전도(EMG)를 사용하는 것이다. 근전도(Electromyography, EMG) 검사는 근육의 활성화를 평가하는 것에 유용한 도구로 적용될 수 있다(Ghezelbash, El Ouaaid, Shirazi-Adl, Plamondon & Arjmand, 2018). 동적 안정성에 대한 객관적인 평가를 하기 위해 힘판(Force Plate)을 이용한 압력중심점(Center Of Pressure, COP)을 활용할 수 있다. COP 값은 지면 반력이 가해지는 즉각적인 지점을 결정하는데 분석될 수 있다(Mettler, Chinn, Saliba, McKeon & Hertel, 2015).

따라서 본 연구에서는 물의 관성 부하가 몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 시 하지의 근 활성도와 지면 반력에 미치는 영향을 비교 분석하여 안정성 향상 및 부상 예방에 기여하고자 한다.

Table 1. Characteristics of subjects N = 24

	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)
Waterbag vest groups (n=12)	21.9±1.6	177.6±4.5	76.6±8.9
Weight vest groups (n=12)	21.9±1.5	176.3±5.0	75.3±7.8

Values are Mean ± SD

METHOD

1. 연구대상자

본 연구는 B광역시에 소재하는 B대학교의 20대 남자 대학생 24명을 대상으로 실시하였고, 현재 근육뼈대계통의 부상이 있는 대상자는 제외하였다. 본 연구의 대상자 수는 G Power 3.0 program (Faul, Erdfelder, Lang & Buchner, 2007)으로 효과 크기 0.5, 검정력 0.8, 유의 수준 0.05으로 적용하였다.

연구대상자들의 신체적 특성은 <Table 1>과 같고, 참여하는 모든 대상자에게 연구 내용을 설명하고 자발적인 참여 동의를 받은 후 실시하였다.

2. EMG 및 COP 측정 방법

1) EMG(표면 근전도) 부착 부위 및 COP(지면 반력) 측정 방법

본 연구는 한 다리 착지 시 우세 다리(모든 대상자가 오른쪽 다리로 확인됨)에 대한 하지 근육의 활성도를 확인하기 위해 표면 근전도(EMG)를 사용하였다. 표면 근전도는 Maniar, Schache, Pizzolato & Opar (2022)의 선행 연구를 참고하여 중간볼기근(gluteus medius), 넙다리곧은근(rectus femoris), 안쪽넓은근(vastus medialis), 가쪽넓은근(vastus lateralis), 넙다리두갈래근(biceps femoris), 반막근(semimembranosus), 장딴지근(gastrocnemius)의 활성도를 측정하였다. 장딴지근의 내측두는 착지 시 힘을 흡수할 준비를 하는 것에 중요한 역할을 한다(Mahaki, Shojaedin & Mahaki, 2013). 그러나 본 연구에서는 물의 관성 부하로 인해 나타나는 불안정성에 대해 내측두와 외측두가 함께 작용하여 발목 관절의 안정성에 중요한 역할을 할 수 있는지 알아보기 위해 내측두와 외측두의 중간 지점에 부착하였다. 측정을 위해 표면 근전도 Noraxon (Ultium EMG, Noraxon, USA)을 사용하였다. 대상자의 피부 표면에 양극의 표면전근(bipolar surface electrode)을 부착하여 근전도 신호를 수집하였고, 데이터 전송 방식은 wi-fi 무선 디지털 통신 방식이며, 샘플링 주파수는 2,000 Hz로 설정하였다. 피부저항을 최소화하기 위해 전극 부착 부위를 알코올 소독용 솜으로 피부를 깨끗이 닦아낸 후 부착하였다(Figure 1, 2). EMG 분석은 최대 수의적 등척성 수축(Maximum Voluntary Isometric Contraction, MVIC)을 측정하여 그에 따른 %MVIC 값으로 설정하였다. 최대 수의적 등척성 수축은 Daniels and Worthingham's muscle Testing (Brown, Hislop & Avers, 2013)의 도수근력검사(Manual Muscle Testing, MMT) 방법을 이용하여 등척성 저항에 대항하여 최대한의 힘을 발휘할 때 개별 근육에 대한 자료를 5초 동안 3번 반복하여 수집하였다. 중간볼기근은 엉덩이와 무릎을 옆으로 놓고 누운 자세에서 엉덩이를 10° 외전 시킨 상태에서 저항을 주어 측정하였다. 넙다리곧은근은 베드에 걸터 앉은 자세에서 무릎을 신전 시킨 상태에서 저항을 주어 측정하였다. 안쪽넓은근은 베드에 걸터 앉은 자세에서 무릎을 내회전 시킨 상태에서 저항을 주어 측정하였다. 가쪽넓은근은 베드에 걸터 앉은 자세에서 무릎을 외회전 시킨 상태에서 저항을 주어 측정하였다. 넙다리두갈래근은 엎드린 자세에서 무릎을 90° 굴곡 시킨 상태에서 시작하여 굴곡 상태로 저항하게 하여 측정하였다. 반막근은 엎드린 자세에서 무릎을 90° 굴곡 시키고 내회전 시킨 상태에서 시작하여 내회전 방향으로 저항을 주어 측정하였다. 장딴지근은 엎드린 자세에서 발을 저측굴곡 시킨 상태에서 저항을 주어 측정하였다. 해당근육의 가장 발달된 부위의 근복(belly of the muscle)에 활성전극(active electrode)과 기준전극(reference electrode)을 근섬유 방향과 평행하게 1 cm 떨어진 지점에 부착하였다(Badier, Guillot, Lagier-Tessonnier, Burnet & Jammes, 1993). 실험 장비는 <Table 2>와 같다.

한 다리 착지 시 착지하는 발의 COP를 확인하기 위해 힘판(AMTI-OR6 Force platforms)을 사용하였으며, 샘플링 주파수는 1,000 Hz로 설정하였다(Figure 3). 지면 반력 측정 시 10 N 이상의 값을 실제 데이터로 사용하였다. 힘판 위에는 미끄럼 방지용 테이프를 부착하여 한 다리 착지 시 미끄럼이 억제되도록 하였다. 지면 반력 측정 시에는 실시하는 절차에 따라 설치되어 있는 장비를 가동시킨 후, 전자적인 노이즈(noise)를 제거하기 위해 약 45분 이상 예열 후 진행하였다(Lafond, Corriveau, Hébert & Prince, 2004).

Figure 1. Surface electromyography equipment (Noraxon)

Figure 2. Surface electromyography attachment sites

Figure 3. COP (Center of Pressure) measurement equipment (AMTI-OR 6)

Table 2. EMG & COP Measurement device

Equipments	Model	Manufacture
EMG equipment	Ultium EMG	Noraxon, USA
EMG analysis software	MR 3.20 version	Noraxon, USA
Surface electrode collar	Single Electrode T246H	SeedTech, Korea
Force platform	OR6-7	AMTI, USA
Force platform amplifier	MSA-6	AMTI, USA
COP analysis software	Nexus	Vicon, USA

2) EMG 및 COP 데이터 수집 구간

본 연구는 몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 시 사용되는 도구에 따른 근 활성도 차이와 지면 반력의 차이를 검증하기 위해 실시하였으며, 모든 대상자는 우세 다리인 오른쪽 다리로 실시하였다. 또한, 근 활성도 측정과 지면 반력 측정을 위한 Force Plate와 EMG 장비의 Sync를 위해 카메라를 이용하여 동영상 촬영을 하였다. 연구대상자가 준비가 되면 준비 신호와 함께 동영상 촬영, Force Plate와 EMG 장비를 동시에 가동하였으며, 준비 신호 후 10초 뒤, 시작 신호와 함께 동작을 시작하여 Force Plate와 EMG의 Sync 신호를 맞추었다. Orishimo, Liederbach, Kremenic, Hagins & Pappas (2014)의 연구를 토대로 높이 30 cm의 박스 위에서 우세 다리 방향으로 몸통을 회전하며 한 다리로 착지하는 동작을 신호에 맞춰 각 도구마다 3회씩 실시하였다. 또한, 몸통 회전 시 회전에 의한 체중 이동이 확실하게 일어날 수 있도록 사전에 대상자에게 측정 시 최대한으로 회전하도록 하였다. 또한 대상자들은 박스 바로 앞에 위치한 힘판의 중앙에 발이 착지하여야 하며, 무릎의 굽힘 각도는 과도한 신전과 굴곡을 방지하기 위하여 60°에서 90° 사이에 위치하도록 지도하였다. 동작은 중량 조끼 그룹 8 kg의 무게로 착용하여 3회, 워터백 조끼 그룹 8 kg의 무게로 착용하여 3회를 실시하였으며, 각 세트마다 3분씩 휴식을 취하도록 하였다. 착지 시 발이 지면에 닿은 순간부터 3초 동안 정지하여 데이터를 수집하였다. 모든 동작은 5초의 주기로 설정하였으며, 신호음은 컴퓨터 프로그램 안에 내장된 메트로놈(Metronome) 음에 맞춰 실시하도록 하였다. 대상자들에게는 사전에 신호음과 시간에 대한 충분한 설명 후 수 차례의 연습을 통해 적응할 수 있도록 지도하였다. 데이터는 각 도구마다 3회씩 수집한 값의 평균을 구하였으며, 착지 후 중심을 잃거나 발이 지면에서 떨어지는

경우는 측정에서 제외하고 30초의 휴식 이후 재측정하였다 (Figure 4).

Figure 4. Measurement posture during single-leg landing with trunk rotation

3. 자료처리 및 분석 방법

본 실험 시 측정된 모든 EMG 자료는 MR 3.20 프로그램 (Noraxon, USA)을 사용하여 분석하였다. 샘플링 주파수는 2,000 Hz로 설정하였고, 대역 통과 필터(band-pass filter) 20~400 Hz로 처리하였으며, 다시 RMS (root mean square)를 통하여 변환된 값을 사용하였다. Filter windows는 150 ms로 설정하여 측정하였다. 본 연구에서는 실험 시작 전 측정 근육들의 MVIC를 측정하였으며, 몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 동작 시 사전에 측정된 MVIC의 근 활성도 값을 사용하여 다음과 같은 방법으로 평준화(normalize) 하였다.

$$muscle\ activation = \frac{EMG_{raw}}{EMG_{MVIC}} \times 100(\%)$$

본 실험 시 측정된 모든 COP 자료는 Vicon System의 분석 프로그램인 Nexus를 이용하였다. COP 분석에 사용된 변수는 한 다리 착지 시 COP의 전후(AP) 범위, 전후(AP) 이동거리, 전후(AP) 속도, 전후(AP) RMS, 좌우(ML) 범위, 좌우(ML) 이동거리, 좌우(ML) 속도, 좌우(ML) RMS, 전후좌우 좌우(APML) 이동거리, 전후좌우 좌우(APML) 속도로 설정하였다. 이러한 변수들은 지면 반력 분석 프로그램에서 산출된 자료를 Microsoft Excel 파일로 저장하고 아래의 공식을 활용하여 Excel에서 산출하였다.

COP 범위는 전후와 좌우로 구분되고, 아래의 공식과 같다.

$$R_{AP} = AP_{max} - AP_{min}$$

$$R_{ML} = ML_{max} - ML_{min}$$

위의 공식에서 AP_{max}와 AP_{min}는 전후 방향 위치의 최대값과 최소값을 의미하고, ML_{max}와 ML_{min}는 좌우 방향 위치의 최대값과 최소값을 의미한다.

COP 거리는 전후와 좌우로 구분되고, 아래의 공식과 같다.

$$D_{AP} = \sum_{n=1}^{N-1} \left| x_{AP(n+1)} - x_{AP(n)} \right|$$

$$D_{ML} = \sum_{n=1}^{N-1} \left| x_{ML(n+1)} - x_{ML(n)} \right|$$

COP 속도는 전후와 좌우로 구분되고, 아래의 공식과 같다.

$$V_{AP} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{N-1} \left(\left| x_{AP(n+1)} - x_{AP(n)} \right| \right)$$

$$V_{ML} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{N-1} \left(\left| x_{ML(n+1)} - x_{ML(n)} \right| \right)$$

RMS 거리는 전후와 좌우로 구분되고, 아래의 공식과 같다.

$$RMS_{AP} = [\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left(x_{AP(n)} - x_{AP} \right)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$RMS_{ML} = [\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left(x_{ML(n)} - x_{ML} \right)^2]^{\frac{1}{2}}$$

COP 평균 속도는 총 거리를 시간으로 나눈 값으로, 아래의 공식과 같다.

$$V = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{N-1} \left[\left(x_{AP(n+1)} - x_{AP(n)} \right)^2 + \left(x_{ML(n+1)} - x_{ML(n)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

4. 통계 처리

본 연구에서 수집된 모든 자료는 SPSS 25.0을 사용하여 평균(M)과 표준편차(SD)를 산출하였다. 모든 일반적 특성과 변수의 정규성 검정은 Shapiro-Wilks test를 이용하여 실시하였다. 도구에 따른 근육 별 EMG 결과 COP 결과의 차이검증은

Table 3. The results of EMG for each muscle between groups (%MVIC)

Variable	Weight vest	Aqua vest	*t*	*p*
Gluteus Medius	20.08±8.41	32.06±9.35	-3.299	0.003*
Rectus Femoris	8.85±5.16	16.50±7.33	-2.954	0.007*
Vastus Medialis	31.50±21.23	32.88±18.93	-0.169	0.868
Vastus Lateralis	26.99±10.57	33.54±13.13	-1.347	0.192
Biceps Femoris	17.55±11.82	19.21±9.71	-0.377	0.710
Semimembranosus	20.33±6.82	28.62±32.30	-0.870	0.394
Gastrocnemius	34.98±15.47	39.69±18.64	-0.674	0.508

Values are Mean ± SD, *: $p < .05$

Table 4. The result of COP between groups

Variable	Weight vest	Aqua vest	*t*	*p*
AP Range (cm)	10.89±2.41	8.30±1.82	2.945	0.007*
AP Displacement (cm)	46.42±10.06	34.37±8.64	3.151	0.005*
AP Vecocity (cm/s)	1.54±0.33	1.14±0.28	3.152	0.005*
AP RMS (cm)	1.06±0.39	0.92±0.15	1.114	0.284
ML Range (cm)	4.58±1.18	4.06±0.72	1.301	0.207
ML Displacement (cm)	18.48±4.75	17.65±3.80	0.473	0.641
ML Velocity (cm/s)	0.61±0.15	0.58±0.12	0.474	0.640
ML RMS (cm)	2.41±0.56	1.74±0.40	3.340	0.003*
APML Displacement (cm)	51.91±10.89	40.22±7.89	3.009	0.006*
APML Velocity (cm/s)	1.73±0.36	1.34±0.26	3.010	0.006*

Values are Mean ± SD, *: $p < .05$

독립표본 *t*-검정(Independent *t*-test)을 실시하였다. 자료의 모든 통계학적 유의 수준은 $p < .05$로 설정하였다.

RESULTS

몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 시 근육 별 그룹 간 EMG 결과는 <Table 3>과 같다.

워터백 조끼군은 중간볼기근과 넙다리곧은근에서 중량 조끼군과 비교하여 통계적으로 유의하게 증가하였으며($p < .05$), 안쪽넓은근, 가쪽넓은근, 넙다리두갈래근, 반막근, 장딴지근에서는 유의한 차이가 없었다.

몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 시 그룹 간 COP 결과는 <Table 4>와 같다.

워터백 조끼군은 전후(AP) 이동범위, 이동거리, 속도, 좌우(ML) RMS, 전후좌우(APML) 이동거리, 속도에서 중량 조끼군과 비교하여 유의하게 감소하였으며($p < .05$), 전후(AP) RMS, 좌우(ML) 이동범위, 이동거리, 속도에서는 유의한 차이가 없었다.

DISCUSSION

한 다리로 착지하는 동작은 무릎 관절의 ACL 부상이나 발목 관절의 염좌와 같은 부상의 위험률을 동반하는 움직임의 패턴을 가지고 있다(Daneshjoo, Abu Osman, Sahebozamani & Yusof, 2015; Sugimoto, Myer, Foss & Hewett, 2015). 또, McKay, Goldie, Payne & Oakes (2001)은 10,000명의 농구 선수들의 부상을 조사한 결과, 착지 시 대부분 하지 부상의 위험이 높으며 발목 관절, 무릎 관절 순으로 부상률이 높다고 하였다. 이

러한 부상은 스포츠 활동에서 흔히 발생하며, 그 중에서도 몸통의 회전을 동반한 착지는 더욱 부상률을 증가시킨다. Della Villa et al. (2020)은 몸통 회전을 동반한 착지 동작은 무릎의 외전 모멘트를 증가시켜 ACL의 부상 위험을 높인다고 하였으며, Roos et al. (2017)은 몸통의 회전이 동반된 착지가 반복되는 경우 발목 염좌의 부상률이 높다고 하였다. 그러므로 하지 근육의 활성화는 착지 후 발생하는 높은 지면 반력에서 오는 충격으로 인한 부상을 예방하고 안정적인 자세 제어를 위해 필요하다(Mueller, Stoll, Mueller, Cassel & Mayer, 2017; Neamatallah, Herrington & Jones, 2020). 그래서 몸통의 회전을 동반한 한 다리 착지 시 발생하는 부담을 해결하기 위해 통합적인 신경근 훈련이 필요하다고 사료되어, 외부 동요를 활용한 워터백을 사용하여 본 연구에 적용하였다.

워터백은 물의 무게를 통해 움직임에 부하를 줄 뿐만 아니라, 튜브 안의 물의 빠른 진동을 통해 균형을 지속적으로 유지하도록 하는 도구이다(Nairn, Sutherland & Drake, 2015). Kang et al. (2023)과 Lee & Kang (2023)은 일반 중량 조끼와 워터백 조끼를 비교한 연구에서 워터백 조끼가 안정근들의 활성화를 높일 수 있고, 특히 하지의 근 활성도가 증가했다고 하였다.

본 연구는 중량 조끼와 워터백 조끼를 이용하여 몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 시, 근육의 활성도와 지면 반력을 살펴보고자 하였다. 그룹 간 근육 별 EMG 결과는 중간볼기근과 넙다리곧은근에서 유의한 차이가 나타났고, 그룹 간 COP 결과는 전후(AP) 범위와 이동거리, 속도, 좌우(ML) RMS, 전후좌우(APML) 이동거리와 속도에서 유의한 차이가 나타났다.

중간볼기근은 착지 시 엉덩 관절이 내전 및 내회전하면서 발생할 수 있는 골반의 비틀림과 무릎 내측에 편중되는 힘을 방지하는 데에 중요한 역할을 하여 착지 시 중간볼기근의 활성화는 무릎에 실리는 부하를 감소시킨다(Maniar et al., 2022). Oshikawa, Adachi, Akuzawa, Okubo & Kaneoka (2021)은 한 다리 착지 동작 시 지면 접촉 후 착지하는 다리 쪽으로의 골반의 과도한 기울임을 감속하기 위해 중간볼기근의 활성도가 증가하였다고 하였다. 넙다리곧은근은 동적인 동작을 하는 동안 무릎의 안정화 역할을 하며, 착지 시 뼈와 인대에 힘이 집중되는 것을 방지하여 부상을 최소화하는데 기여한다(Ross, Guskiewicz & Yu, 2005; Maniar, Schache, Pizzolato & Opar, 2020). Pilanthananond, Tharawadeepimuk, Saengsirisuwan & Limroongreungrat (2023)은 한 다리 착지 동작 단계의 초기 부분에서 넙다리곧은근이 높은 활성화를 보였으며, 이것은 넙다리곧은근이 질량 중심(center of mass, COM)의 이동을 감소시켜 무릎의 안정성을 유지하려는 이유라고 하였다. 따라서 본 연구에서는 물의 관성 부하를 이용한 워터백이 무릎에 실리는 부하를 감소시키는 중간볼기근과 무릎의 안정화 역할을 하는 넙다리곧은근의 활성화를 증가시켰을 것이라고 판단된다. 또한, 본 연구에서는 몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 동작을 진행하였고 착지 시 발이 지면에 닿은 순간부터 3초 동안의 데이터를 수집하였다. 몸통 회전 시 워터백을 통한 외부 동요로 인해 만들어진 불안정성을 몸통과 골반의 안정성을 조절하는 근육인 중간볼기근(Frank et al., 2013; Kim, Unger, Lanovaz & Oates, 2016)과 한 다리 착지 중 몸통의 COG (Center Of Gravity)를 조절하는 넙다리곧은근(Brown, McLean & Palmieri-Smith, 2014)이 함께 활성화하여 안정성을 유지했을 것이라고 사료된다. 중량 조끼군과 워터백 조끼군의 집단 간 안쪽넓은근, 가쪽넓은근, 넙다리두갈래근, 반막근, 장딴지근에서 유의한 차이가 나타나지 않은 것 또한, 몸통의 측굴이나 회전의 움직임 시 주로 몸통 근육이 움직임 수행과 동시에 척추의 안정성을 조절하기 때문에(McGill, Grenier, Kavcic & Cholewicki, 2003; Vera-Garcia, Elvira, Brown & McGill, 2007), 본 연구의 몸통 회전을 동반한 동작에서 몸통과 골반의 안정성을 위해 중간볼기근과 넙다리곧은근이 더욱 활성화되었기 때문에 다른 근육에서는 유의한 차이가 나타나지 않은 것으로 사료된다.

또, COP는 지지 기반 내에서 무게 중심을 유지하기 위해 작용하는 근신경계의 활동을 반영하여 확인할 수 있는 지표이며(Moreno, Caballero & Barbado, 2022), 특히 자세 유지 능력은 전정기관, 근육과 관절의 고유수용체와 시각의 협응이 작용된 결과이며 이를 판단할 수 있는 자료로 사용된다(Chen, Liu, Xiao, Liu & Wang, 2021). 또한 횡단면(transverse plane)의 움직임은 몸통 회전의 가변성(variability)을 나타낼 수 있어 자세 유지 능력 평가에 중요한 역할을 한다(Ko, Han & Newell, 2024). Cimadoro, Paizis, Alberti & Babault (2013)은 다른 모양의 Wobble board에서 전후(AP), 좌우(ML) COP 값을 비교한 연구 결과, 좌우의 이동만 가능한 wobble board에서 전후(AP) 모든 COP 변인에서 유의한 차이가 나타났다고 하였다. 또한, Kang et al. (2024)은 만성 발목 불안정성을 가진 대상자들에게 물의 관성 부하 훈련이 미치는 효과를 연구한 결과, 물의 관성 부하 훈련 이후 착지 동작에서 전후(AP)와 좌우(ML) 모든 COP 변인에서 값이 감소되었으며 이것은 물의 관성 부하를 적용한 불안정한 움직임에 대한 반사적 반응을 통해 강한 안정화가 형성된 것이라고 하였다. 본 연구에서 물의 관성 부하는 높은 불안정성을 만들어내지만, 몸통과 골반의 안정성을 유지하기 위해 중간볼기근과 넙다리곧은근의 근 활성도가 높게 나타나 안정성을 유지한 것으로 판단된다. 또한, 하지 근육은 외부 동요가 발생하는 환경에서 발목 관절의 흔들림을 최소화하기 위해 더욱 활성화되지만(Kim & Hwang, 2018), 중간볼기근과 넙다리곧은근이 몸통 회전 시 발생하는 불안정성에 대한 안정성을 향상시키면서 COP 값이 감소되는 결과를 만들어내었다고 사료된다. 특히, 본 연구에서 전후(AP) 이동범위, 이동거리, 속도가 감소한 것은 인체는 시상면

(sagittal plane)에서 질량 중심(COM)이 발목 관절 앞에 위치하게 되고 중력에 의해 발생하는 외적 토크(torque)로 인해 신체가 앞으로 넘어지게 되는 원리(Winter, 1995; Winter, Patla, Rietdyk & Ishac, 2001)로 인해 안정성을 증가시키기 위해 감소된 것이라고 판단되며, 여기에 몸통 회전이 동반되면서 질량 중심(COM)을 지지 기반 내에 유지하기 위한 근육의 활성화로 인해(Cimadoro et al., 2013) 전후좌우(APML) 이동거리와 속도 또한 감소한 것이라고 판단된다.

불안정성이 증가하면 압력 중심의 이동이 크게 나타나고(Mitchell, Dyson, Hale & Abraham, 2008), 안정화가 유지되는 시간이 길어 자세 조절 능력이 감소된다(Gribble & Robinson, 2009; Kunugi, Masunari, Yoshida & Miyakawa, 2017). 그러나, 불안정성의 특성을 이용한 신경근 조절 훈련을 통해 감각 운동 통합(Sensorimotor integration)의 효과를 얻을 수 있으며, 자세 조절 능력을 유지하기 위한 근육의 활성도 또한 증가한다(Kim & Kim, 2006; Oh, Park, Kim & Kwon, 2003). Hatfield et al. (2017)은 한 다리로 수행되는 동작 시 중간볼기근, 넙다리곧은근, 넙다리두갈래근이 함께 활성화되는 것은 무릎을 안정화시키는 전략이라고 하였으며, Coratella et al. (2021)은 하지 운동 시 중간볼기근과 넙다리곧은근의 높은 활성화는 무릎이 내측으로 무너지는 것을 방지하기 위함이라고 하였다. 그러므로 본 연구의 결과는 워터백 조끼에서 발생하는 외부 동요로 인한 불안정성을 중간볼기근과 넙다리곧은근이 일시적으로 높은 근 활성도를 나타내어 안정성을 만들어내고 COP 값을 감소시킨 것으로 해석된다.

본 연구는 일회성으로 측정된 연구이므로 외부 동요를 이용하여 장시간의 훈련을 통한 학습의 효과라고 판단하기에는 다소 부족함이 있다. 하지만, Kang et al. (2024)의 물의 관성 부하 훈련이 COP 값을 감소시켰다는 연구 결과와 Park, Lim & Kim (2016)의 불안정성을 동반한 훈련이 COP 값에서 유의한 차이가 나타났다는 결과를 바탕으로 하여 본 연구 또한 COP 값이 감소된 것은 외부 동요를 만들어내는 워터백 조끼가 근신경계의 활성도를 활발하게 하여 안정성에 기여한 것으로 해석할 수 있다.

물의 관성 부하는 다양하게 변화하는 속도, 방향으로 인해 불안정성을 만드는 외부 동요 요소로서 다양한 신경계를 자극하여 동적 안정성을 개선하기 위한 도구로 적합한 것으로 판단된다.

CONCLUSION

본 연구의 목적은 물의 관성 부하가 몸통 회전을 동반한 한 다리 착지 시 하지의 근 활성도와 COP 값에 미치는 영향에 대해 일회성으로 비교 분석하여 물의 관성 부하를 이용한 도구가 특정 동작 시 안정성에 어떠한 영향을 주는 지에 대해 알아보고자 하였다. 본 연구의 결과는 측정된 일곱 부위의 근육 중 중간볼기근, 넙다리곧은근에서 워터백 조끼 착용 시 유의한 차이가 있었으며, COP 결과는 전후(AP) 범위와 이동거리와 속도, 좌우(ML) RMS, 전후좌우(APML) 이동거리와 속도에서 유의한 차이가 있었다. 불안정성이 증가하면 압력 중심의 이동이 크게 나타나고 자세 조절 능력이 감소되는 것이 일반적이지만, 중간볼기근과 넙다리곧은근의 근 활성도가 일시적으로 안정성을 증가시켜 신경근 활성과 자세 조절 능력이 증가된 것으로 해석된다. 따라서 본 연구는 물의 관성 부하를 이용한 도구의 효과를 검증하는 것을 목적으로 일회성 측정을 진행한 것이므로, 본 연구의 결과를 토대로 하여 차후 물의 관성 부하 훈련 프로그램을 고안하여 하지의 안정성 개선을 위한 연구와 더 나아가 스포츠 특이적 훈련, 운동 수행 능력에 미치는 효과에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study hasbeen supported by academic funding from Busan University of Foreign Studies.

REFERENCES

Ali, N., Robertson, D. G. E. & Rouhi, G. (2014). Sagittal plane body kinematics and kinetics during single-leg landing from increasing vertical heights and horizontal distances: Implications for risk of non-contact ACL injury. *The Knee*, *21*(1), 38-46.

Badier, M., Guillot, C., Lagier-Tessonnier, F., Burnet, H. & Jammes, Y. (1993). EMG power spectrum of respiratory and skeletal muscles during static contraction in healthy man. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, *16*(6), 601-609.

Brown, M., Hislop, H. & Avers, D. (2013). Daniels and Worthingham's Muscle Testing-E-Book: Daniels and Worthingham's Muscle Testing-E-Book. Elsevier Health Sciences.

Brown, T. N., McLean, S. G. & Palmieri-Smith, R. M. (2014). Associations between lower limb muscle activation strategies and resultant multi-planar knee kinetics during single leg landings. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *17*(4), 408-413.

Calatayud, J., Colado, J. C., Martin, F., Casaña, J., Jakobsen, M. D. & Andersen, L. L. (2015). Core muscle activity during the clean and jerk lift with barbell versus sandbags and water

bags. *International Journal of Sports Physical Therapy*, *10*(6), 803.

Chen, B., Liu, P., Xiao, F., Liu, Z. & Wang, Y. (2021). Review of the upright balance assessment based on the force plate. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(5), 2696.

Chijimatsu, M., Ishida, T., Yamanaka, M., Taniguchi, S., Ueno, R., Ikuta, R., Samukawa, M., Ino, T., Kasahara, S. & Tohyama, H. (2020). Landing instructions focused on pelvic and trunk lateral tilt decrease the knee abduction moment during a single-leg drop vertical jump. *Physical Therapy in Sport*, *46*, 226-233.

Cho, J. H., Kim, K. H., Moon, G. S., Cho, Y. J. & Lee, S. C. (2010). Analysis of injury mechanism on ankle and knee during drop landings according to landing directions. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *20*(1), 67-73.

Cimadoro, G., Paizis, C., Alberti, G. & Babault, N. (2013). Effects of different unstable supports on EMG activity and balance. *Neuroscience Letters*, *548*, 228-232.

Coratella, G., Tornatore, G., Caccavale, F., Longo, S., Esposito, F. & Cè, E. (2021). The activation of gluteal, thigh, and lower back muscles in different squat variations performed by competitive bodybuilders: implications for resistance training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(2), 772.

Critchley, M. L., Davis, D. J., Keener, M. M., Layer, J. S., Wilson, M. A., Zhu, Q. & Dai, B. (2019). The effects of mid-flight whole-body and trunk rotation on landing mechanics: implications for anterior cruciate ligament injuries. *Sports Biomechanics*, *19*(4), 421-437.

Daneshjoo, A., Abu Osman, N. A., Sahebozamani, M. & Yusof, A. (2015). Analysis of jumping-landing manoeuvers after different speed performances in soccer players. *PloS One*, *10*(11), e0143323.

Davis, D. J., Hinshaw, T. J., Critchley, M. L. & Dai, B. (2019). Mid-flight trunk flexion and extension altered segment and lower extremity joint movements and subsequent landing mechanics. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *22*(8), 955-961.

Della Villa, F., Buckthorpe, M., Grassi, A., Nabiuzzi, A., Tosarelli, F., Zaffagnini, S. & Della Villa, S. (2020). Systematic video analysis of ACL injuries in professional male football (soccer): injury mechanisms, situational patterns and biomechanics study on 134 consecutive cases. *British Journal of Sports Medicine*, *54*(23), 1423-1432.

Farì, G., Megna, M., Fiore, P., Ranieri, M., Marvulli, R., Bonavolontà, V., Bianchi, F. P., Puntillo, F., Varrassi, G. & Reis, V. M. (2022). Real-time muscle activity and joint range of motion monitor to improve shoulder pain rehabilitation in wheelchair basketball players: a non-randomized clinical study. *Clinics and Practice*, *12*(6), 1092-1101.

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G. & Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*(2), 175-191.

Frank, B., Bell, D. R., Norcross, M. F., Blackburn, J. T., Goerger, B. M. & Padua, D. A. (2013). Trunk and hip biomechanics influence anterior cruciate loading mechanisms in physically active participants. *The American Journal of Sports Medicine*, *41*(11), 2676-2683.

Ghezelbash, F., El Ouaaid, Z., Shirazi-Adl, A., Plamondon, A. & Arjmand, N. (2018). Trunk musculoskeletal response in maximum voluntary exertions: A combined measurement-modeling investigation. *Journal of Biomechanics*, *70*, 124-133.

Gribble, P. A. & Robinson, R. H. (2009). Alterations in knee kinematics and dynamic stability associated with chronic ankle instability. *Journal of Athletic Training*, *44*(4), 350-355.

Hatfield, G. L., Charlton, J. M., Cochrane, C. K., Hammond, C. A., Napier, C., Takacs, J., Krowchuk, N. M. & Hunt, M. A. (2017). The biomechanical demands on the hip during progressive stepping tasks. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *31*(12), 3444-3453.

Kang, S. H., Lee, J. Y. & Park, I. B. (2023). The EMG Analysis Study According to Weight and Water Bag Vest during Push Movement in Badminton Players. *Journal of Converging Sport and Exercise Sciences*, *21*(3), 229-239.

Kang, S. H., Jo, H. S. & Park, I. B. (2024). The Effect of Inertial Load of Water Training on Dynamic Stability and Functional Movement of Amateur Football Players with Chronic Ankle Instability. *Journal of Sport and Dance Science*, *4*(1), 55-66.

Kim, D., Unger, J., Lanovaz, J. L. & Oates, A. R. (2016). The relationship of anticipatory gluteus medius activity to pelvic and knee stability in the transition to single-leg stance. *Pm&r*, *8*(2), 138-144.

Kim, S. Y. & Kim, T. Y. (2006). Theoretical basis and application of the neurac technique which uses the sling exercise therapy. *The Journal of Korean Academy of Orthopedic Manual Physical Therapy*, *12*(2), 52-65.

Kim, D. & Hwang, J. M. (2018). The center of pressure and ankle muscle co-contraction in response to anterior-posterior perturbations. *PloS One*, *13*(11), e0207667.

Ko, J. H., Han, D. W. & Newell, K. M. (2024). Skill level and the free moment during a pistol aiming task. *Sports Biomechanics*, *23*(8), 987-996.

Kunugi, S., Masunari, A., Yoshida, N. & Miyakawa, S. (2017). Postural stability and lower leg muscle activity during a diagonal single-leg landing differs in male collegiate soccer players with and without functional ankle instability. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, *6*(4), 257-265.

Lafond, D., Corriveau, H., Hébert, R. & Prince, F. (2004). Intra-session reliability of center of pressure measures of postural steadiness in healthy elderly people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *85*(6), 896-901.

Lees, A. (1981). Methods of impact absorption when landing from a jump. *Engineering in Medicine*, *10*(4), 207-211.

Lee, H. H., Lin, C. W., Wu, H. W., Wu, T. C. & Lin, C. F. (2012). Changes in biomechanics and muscle activation in injured ballet dancers during a jump-land task with turnout (Sissonne Fermée). *Journal of Sports Sciences*, *30*(7), 689-697.

Lee, J. Y. & Kang, S. (2023). Comparison of Dynamic Muscle Activation during Fente Execution in Fencing Between Wearing Weighted and Waterbag Vests. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, *33*(4), 119-127.

Mahaki, M., Shojaedin, S. S. & Mahaki, B. (2013). The comparsion of the activity pattern of lower limb muscles during single leg drop landing. *Journal of Health System Research*, *9*(9), 993-1004.

Maniar, N., Schache, A. G., Pizzolato, C. & Opar, D. A. (2020). Muscle contributions to tibiofemoral shear forces and valgus and rotational joint moments during single leg drop landing. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *30*(9), 1664-1674.

Maniar, N., Schache, A. G., Pizzolato, C. & Opar, D. A. (2022). Muscle function during single leg landing. *Scientific Reports*, *12*(1), 11486.

McGill, S. M., Grenier, S., Kavcic, N. & Cholewicki, J. (2003). Coordination of muscle activity to assure stability of the lumbar spine. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *13*(4), 353-359.

McKay, G. D., Goldie, P. A., Payne, W. R. & Oakes, B. W. (2001). Ankle injuries in basketball: injury rate and risk factors. *British Journal of Sports Medicine*, *35*(2), 103-108.

Meng, L., Kong, L., Kong, L., Zhang, Q., Shen, J. & Hao, Y. (2022). Effects of visual deprivation on the injury of lower extremities among functional ankle instability patients during drop landing: A kinetics perspective. *Frontiers in Physiology*, *13*, 1074554.

Mettler, A., Chinn, L., Saliba, S. A., McKeon, P. O. & Hertel, J. (2015). Balance training and center-of-pressure location in participants with chronic ankle instability. *Journal of Athletic Training*, *50*(4), 343-349.

Mitchell, A., Dyson, R., Hale, T. & Abraham, C. (2008). Biomechanics of ankle instability. Part 2: Postural sway-reaction time relationship. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *40*(8), 1522-1528.

Moreno, F. J., Caballero, C. & Barbado, D. (2022). Postural control strategies are revealed by the complexity of fractional components of COP. *Journal of Neurophysiology*, *127*(5), 1289-1297.

Mueller, S., Stoll, J., Mueller, J., Cassel, M. & Mayer, F. (2017). Trunk muscle activity during drop jump performance in adolescent athletes with back pain. *Frontiers in Physiology*, *8*, 274.

Munoz-Martel, V., Santuz, A., Bohm, S. & Arampatzis, A. (2021). Neuromechanics of dynamic balance tasks in the presence of perturbations. *Frontiers in Human Neuroscience*, *14*, 560630.

Nagano, Y., Ida, H., Akai, M. & Fukubayashi, T. (2007). Gender differences in knee kinematics and muscle activity during single limb drop landing. *The Knee*, *14*(3), 218-223.

Nairn, B. C., Sutherland, C. A. & Drake, J. D. (2015). Location of instability during a bench press alters movement patterns and electromyographical activity. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *29*(11), 3162-3170.

Neamatallah, Z., Herrington, L. & Jones, R. (2020). An investigation into the role of gluteal muscle strength and EMG activity in controlling HIP and knee motion during landing tasks. *Physical Therapy in Sport*, *43*, 230-235.

Niu, W., Wang, Y., He, Y., Fan, Y. & Zhao, Q. (2010). Biomechanical gender differences of the ankle joint during simulated half-squat parachute landing. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *81*(8), 761-767.

Niu, W., Wang, Y., He, Y., Fan, Y. & Zhao, Q. (2011). Kinematics, kinetics, and electromyogram of ankle during drop landing: a comparison between dominant and non-dominant limb. *Human Movement Science*, *30*(3), 614-623.

Niu, W., Wang, Y., Yao, J., Zhang, M., Fan, Y. & Zhao, Q. (2011). Consideration of gender differences in ankle stabilizer selection for half-squat parachute landing. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *82*(12), 1118-1124.

Oh, J. S., Park, J. S., Kim, S. Y. & Kwon, O. Y. (2003). Comparison of muscle activity during a push-up on a suspension sling and a fixed support. *Physical Therapy Korea*, *10*(3), 29-40.

Orishimo, K. F., Liederbach, M., Kremenic, I. J., Hagins, M. & Pappas, E. (2014). Comparison of landing biomechanics between male and female dancers and athletes, part 1: Influence of sex on risk of anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, *42*(5), 1082-1088.

Oshikawa, T., Adachi, G., Akuzawa, H., Okubo, Y. & Kaneoka, K. (2021). Coordinate activity of the quadratus lumborum posterior layer, lumbar multifidus, erector spinae, and gluteus medius during single-leg forward landing. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *61*, 102605.

Park, K. H., Lim, J. Y. & Kim, T. H. (2016). The effects of ankle strategy exercises on unstable surfaces on dynamic balance and changes in the COP. *Journal of Physical Therapy Science*, *28*(2), 456-459.

Pilanthananond, M., Tharawadeepimuk, K., Saengsirisuwan, V. & Limroongreungrat, W. (2023). Muscle Activation and Ground Reaction Force between Single-Leg Drop Landing and Jump Landing among Young Females during Weight-Acceptance Phase. *Sports*, *11*(9), 185.

Ross, S. E., Guskiewicz, K. M. & Yu, B. (2005). Single-leg jump-landing stabilization times in subjects with functionally unstable ankles. *Journal of Athletic Training*, *40*(4), 298.

Roos, K. G., Kerr, Z. Y., Mauntel, T. C., Djoko, A., Dompier, T. P. & Wikstrom, E. A. (2017). The epidemiology of lateral ligament complex ankle sprains in National Collegiate Athletic Association sports. *The American Journal of Sports Medicine*, *45*(1), 201-209.

Sugimoto, D., Myer, G. D., Foss, K. D. B. & Hewett, T. E. (2015). Specific exercise effects of preventive neuromuscular training intervention on anterior cruciate ligament injury risk reduction in young females: meta-analysis and sub-group analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *49*(5), 282-289.

Taniguchi, S., Ishida, T., Yamanaka, M., Ueno, R., Ikuta, R., Chijimatsu, M., Samukawa, M., Koshino, Y., Kasahara, S. & Tohyama, H. (2022). Sex difference in frontal plane hip moment in response to lateral trunk obliquity during single-leg landing. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, *14*(1), 70.

Vera-Garcia, F. J., Elvira, J. L., Brown, S. H. & McGill, S. M. (2007). Effects of abdominal stabilization maneuvers on the control of spine motion and stability against sudden trunk perturbations. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *17*(5), 556-567.

Waldén, M., Krosshaug, T., Bjørneboe, J., Andersen, T. E., Faul, O. & Hägglund, M. (2015). Three distinct mechanisms predominate in non-contact anterior cruciate ligament injuries in male professional football players: a systematic video analysis of 39 cases. *British Journal of Sports Medicine*, *49*(22), 1452-1460.

Wezenbeek, E., Verhaeghe, L., Laveyne, K., Ravelingien, L., Witvrouw, E. & Schuermans, J. (2022). The Effect of aquabag use on muscle activation in functional strength training. *Journal of Sport Rehabilitation*, *31*(4), 420-427.

Winter, D. A. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, *3*(4), 193-214.

Winter, D. A., Patla, A. E., Rietdyk, S. & Ishac, M. G. (2001). Ankle muscle stiffness in the control of balance during quiet standing. *Journal of Neurophysiology*, *85*(6), 2630-2633.

Yeow, C. H., Lee, P. V. S. & Goh, J. C. H. (2009). Effect of landing height on frontal plane kinematics, kinetics and energy dissipation at lower extremity joints. *Journal of Biomechanics*, *42*(12), 1967-1973.

Zazulak, B. T., Hewett, T. E., Reeves, N. P., Goldberg, B. & Cholewicki, J. (2007). Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: prospective biomechanical-epidemiologic study. *The American Journal of Sports Medicine*, *35*(7), 1123-1130.