

Original Article

Analysis of Biomechanical Variables Based on the Imbalance of Ankle Muscle Strength in Ballet Dancers

Eun-kyo Chung, Seong-Hun Kim and Bee-Oh Lim*

Chung-Ang University

Article Info

Received 2022.11.02.

Revised 2023.01.31.

Accepted 2023.02.03.

Correspondence*

Bee-Oh Lim

bolim@cau.ac.kr

Key Words

Ankle muscle imbalance,
Reciprocal muscle strength ratio,
Ballet,
Relevé,
Net joint moment

PURPOSE The purpose of this study is to analyze the biomechanical variables involved in ballet dancers' ankle muscle imbalance when performing relevé movements. **METHODS** The subjects of this study (n=14, age: 22.29±1.73 years old, height: 161.4±5.06cm, weight: 51.88±7.51kg) were 14 ballet dancers with 9 years of experience. Based on the reciprocal muscle strength ratio, the dancers were divided into the following groups: Close to the normal value (RMIS) and far from the normal value (RMIB) using the maximum values of plantar flexion and dorsiflexion of the ankle joint using an isokinetic measurement equipment (60°/sec). RMIB). The biomechanical variables, namely the ankle joint movement and ground reaction force, were subsequently measured. SPSS 26.0 was used for data analysis and independent t-test was used for statistical verification. **RESULTS** The ground reaction force in the Z (vertical) direction based on the ankle joint muscle strength imbalance of ballet dancers was significantly lower in the RMIB group. In addition, although it was not a statistically significant difference, the plantar flexion movement was lower in the RMIB group, and there was a significant difference in the generation of ankle joint movement in the Z direction. **CONCLUSIONS** In conclusion, in order for a ballet dancer to efficiently utilize the force generated from the supporting leg when performing a movement, ankle imbalance must be taken into consideration when training.

서론

발레 무용수에게 있어 동작을 잘 수행하는 것이 중요하다면, 발레 연구자에게 있어서는 동작 수행의 요인을 밝히는 것은 중요하다. 현재까지 발레 무용수의 동작 수행 연구는 동작 자체를 정량적으로 분석한 연구에 그치거나(Lin et al., 2005; Olaya Mira et al., 2019; Park, 2014; Souza Gontijo et al., 2015; Wilson et al., 2004), 숙련자와 비숙련자 간 차이를 비교 후 숙련자 결과를 토대로 효과적인 훈련 방법을 제시하고 있는 연구가 대부분이다(Kang et al., 2007; Lee, 2012; Lee et al., 2014). 이는 효과적인 훈련에 필요한 기준점을 제공한다는 측면에서는 연구의 가치가 있지만, 비숙련자에게만 적용할 수 있는 정보이자 동작 수행의 근본적인 원인을 밝히는 데에는 아쉬움이 남는다.

대부분의 발레 동작은 한쪽 다리를 지지 다리로, 다른 한쪽 다리

를 움직이는 동작 다리로 사용한다. 이때 지지하는 다리 측 발뒤꿈치를 바닥에서 들어 올려 발목의 저축 굴곡(plantar flexion), 즉, 플르베(relevé)를 유지하면서 발끝으로 신체를 지지하고, 동작하는 다리로는 역동적인 동작을 수행한다. 플르베는 동작을 수행함과 동시에 기저면(base of support)이 극도로 작아짐으로써 한 발로 균형을 잡는 고도의 기술로 아라베스크(Arabesque), 데벨로페 알라스콘(Développé à la seconde), 피루엣(Pirouette) 등과 같은 또 다른 고난도 발레 동작을 수행하기 위한 중요한 기술이다(Hong, 2004).

플르베 동작 수행 시 지면반력은 지면에 접촉된 발바닥이 지면과 서로 반대되는 방향으로 밀어내는 과정에서 생성되며, 배측굴곡(dorsiflexion)보다 저축굴곡(plantarflexion) 근력이 요구되는(Bruyneel, Bertrand & Mesure, 2018; Joo, 2017; Kim & Choi, 2000) 동작이다. 특히, 다수의 연구에서 플르베 동작 수행 시 생성되는 변인들이 발레 동작을 성공적으로 수행하는 데 영향을 미치는 요인으로서 검증되었다(Bruyneel et al., 2018; Joo, 2017; Kim & Choi, 2000). 예를 들어, 지지 다리 측 발끝으로는 신체를 세우며, 동작 다리 측 엉덩 관절을 최대한 신전(extension)시키고 균형을 유지하는 드미-포인트 밸런스(Demi-Point Balance) 동작 수행에서 지

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

지 다리 측 Z(수직) 방향 지면반력은 동작을 오랫동안 유지할 수 있는 시간, 즉 균형 요인에 영향을 미치는 것으로 보고하였다(Park, 2004). Cho(2020)의 연구에서도 지지 다리 측 발끝으로 신체를 세우며, 동작 다리 측 다리를 앞 방향으로 들어 올리는 데벨로페 드방(developpe devant) 동작에서 숙련자 간 지지 다리 측 지면반력 차이에 의해 가장 성공적인 동작 수행 여부(최대 각 기준)가 결정되었다. 또한, Youm(2005)은 지지 다리를 측으로 하여 동작 다리를 옆(a la seconde)으로 최대한 들어 올리는 그랑 바트방 주페 알라스콘(grand battement jete a la seconde) 동작에서 지지 다리 측 발목관절 모멘트와 동작 다리 측 하지 관절 가동 범위(range of motion)와 유의한 상관관계를 검증하였다. 이는 즉, 유사한 발레 경력을 가진 숙련자 간에도 지지 다리 측 운동 역학적 변인에 차이가 나타날 수 있음을 시사함과 동시에, 다수의 발레 동작의 안정성이나 효율성의 여부를 결정짓는 데 있어 틀르베 동작 수행 시 지지 다리 측 운동 역학적 변인에 영향을 미치는 요인을 검증하는 연구의 필요성이 모색된다.

근력 불균형(strength imbalance) 지표로 검증되고 있는 동측 근력비(Reciprocal muscle strength ratio)는 주동근(agonist)과 길항근(antagonist) 근력의 상대적인 비율을 의미한다(Seo et al., 2017). 스포츠 과학 분야에서 동측 근력비 연구의 주 초점은 근력 불균형이 존재하는 근육을 주동근으로 사용하는 동작 분석을 통하여 근력 불균형이 운동 손상에 영향을 미치는가를 검증하는 것이다(Kim & Jung, 2019; Kim et al., 2011; Kim et al., 2015; Schons et al., 2019). 그러나 이는 연구적 방법 측면으로 다시 말해서 근력 불균형과 운동 손상 간 관계를 결론으로 제시하기 이전에 근력 불균형과 동작 수행 간 관계를 직접 검증한 연구라고도 볼 수 있다. 이와 관련하여 Sohn(2019)은 주동근과 길항근 간 근력 불균형과 움직임과의 관계를 직접적으로 검증하였으며, 근력 불균형이 동작을 수행하는 데 있어 제한적인 요인이 될 수 있음을 검증하였다.

발레는 특정 근육을 주동근으로 사용하기 때문에 발레 무용수 근력 불균형은 높게 노출되어 있으며, 특히, 발목관절 저측 굴곡근과 배측 굴곡근은 다른 부위에 비하여 일관적으로 높은 불균형 결과가 보고되고 있다(Lee & Lee, 1999; Lee et al., 2009; Lim & Yoon, 2014). 이는 앞서 언급한 바와 같이 근력 불균형이 동작 수행에 제한적인 요인이 될 수 있다는 점에서 볼 때 발목 근력 불균형이 틀르베 동작 수행에 영향을 미칠 수 있음을 유추할 수 있다. 여러 연구에서 근력 불균형과 동작 수행 간 유의한 관계성이 검증되고 있음에도 불구하고(Sohn, 2019; Ruas et al., 2015), 발레 동작 수행에 영향을 미치는 요인으로서 발목 근력 불균형을 적용한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 독립변인으로 지지 다리 측 주동근인 저측 굴곡근과 길항근인 배측 굴곡근 간 동측 근력비에 따라 집단을 나누고, 종속 변인으로 지지 다리 측 순관절 모멘트(net joint moment), 지면반력(ground reaction force, GRF)을 변인으로 설정하여 발레 무용수 발목 근력 불균형에 따른 틀르베 동작 수행 시 운동 역학적 변인의 차이를 분석하고자 한다. 본 연구에서 이 같은 영향이 검증된다면 첫째, 등속성 장비를 이용한 발목관절의 저측 굴곡근과 배측 굴곡근 정상적인 균형비라는 수치화된 객관적인 기준치를 제공함으로써 코치 및 발레 무용수에게 훈련 프로그램의 목표 설정의 기준이 될 것이며, 훈련 과정에 있어서 훈련이 적합한지 점검할 수 있는 훈련 방향을 제시해 줄 수 있다는 점에서 연구의 가치가 있을 것으로 보인다.

연구 방법

연구 대상

본 연구는 C대학의 연구윤리 위원회(Institutional Review Board)에서 승인을 받은 후 진행되었다(IRB No. 1041078-202011-HRBM-346-01). 본 연구의 대상자는 S시 소재 대학 9년 경력 여성 발레 무용수 14명이다. 연구대상자 선정에 있어 발목관절 최대 근력 및 동작 수행 변인으로서의 영향을 통제하기 위하여 최근 6개월간 발목과 무릎관절을 포함하여 하지 근골격계 병력이 없는 자를 선정하였다. 모든 연구대상자는 자발적으로 참여하였으며, 참여 전 실험 목적, 절차, 위험성에 관해 설명을 듣고 동의서에 서명 후 진행하였다. 연구대상자의 신체적 특성 다음 Table 1과 같다.

최대 근력 측정

최대 근력 측정은 본 근력 불균형에 따른 집단 구분을 위한 동측 근력비를 산출하기 위한 것으로 등속성 근력 측정 장비(Humac Norm Model, csmi社, USA)를 이용하여 발목관절 저측 굴곡근과 배측 굴곡근 최대 근력(peak torque)을 측정하였다. 모든 대상자는 갑작스러운 근수축으로 인한 상해를 예방하기 위하여 준비운동(warm-up) 과정을 거쳤다. 발목관절 외 다른 근육군에 의한 영향을 통제하기 위하여 신체를 고정하고, 60°/sec 부하 속도에서 3회 측정된 평균값을 자료 산출에 이용하였다.

Table 1. Characteristic subjects

Age (years)	Work (yr.)	Height (cm)	Weight (kg)	BMI (kg/m ²)
22.29±1.73	9.4±2.6	161.4±5.06	51.88±7.51	19.86±2.17



Fig. 1. Maximal strength measurement

집단 구분 절차

1. 동측 근력비 산출

본 연구의 동측 근력비 산출 부위는 지지 다리 측 발목관절로 최대 근력 측정을 통하여 산출된 값을 개인별 체중(body weight)으로 표준화시켜 관절의 정상적인 근력 균형비(Wathen, 1994)에 근거하여 아래 공식에 적용하였다. 관절의 정상적인 근력 균형비에 따르면 발목관절의 경우 저측 굴곡근과 배측 굴곡근의 비율은 3:1이며(Wathen, 1994), 이 균형비를 기준으로 틀르베 동작 수행 시 주동근은 저측 굴곡근 길항근은 배측 굴곡근으로 아래 공식을 적용한 결과 본 연구에서 적용될 동측 근력비 정상치 값은 33.33%로 산출되었다.

$$\text{관절의 동측 근력비} = \frac{\text{길항근의 최대 근력(peak torque)}}{\text{주동근의 최대 근력(peak torque)} \times 100}$$

집단 구분

본 연구의 집단 구분을 위하여 발레 무용수 좌·우측 중에서 지지 다리 측 주동 다리를 기준으로 14개의 값을 추출하였다. Sohn(2019) 연구에서 적용한 집단 구분 방법을 참고하여 동측 근력비가 정상치에서 가까운 집단과 정상치에서 먼 집단으로 구분하였다. 집단 구분의 기준은 산출된 14개의 동측 근력비 최소값부터 최대값까지 범위를 100% 기준으로 설정하여, 정상치 값 33.33%를 기준으로 $\pm 25\%$ 이내에 해당하는 집단을 동측 근력비가 정상치에서 가까운 집단(RMIS: Reciprocal muscle strength imbalance small group)(n=5), 정상치 값 33.33%를 기준으로 $\pm 25\%$ 이내에 해당하지 않는 집단을 동측 근력비가 정상치에서 먼 집단(RMIB: Reciprocal muscle strength imbalance BIG group)(n=9)으로 조작적 정의를 통하여 구분하였다(Figure 2).

틀르베 동작 수행

상체 움직임은 본 연구의 종속 변인인 운동 역학적 변인에 영향을 미칠 수 있다는 선행 연구(Park & Kim, 2009; Youm, 2004)에 근거하여, 모든 연구대상자의 상체 움직임을 일괄적으로 통일하여 시행하였다. 또한, 포인트 슈즈 착용 기간에 따라 하지 운동 역학적 변인에 차이가 있다는 점(Bickle et al., 2018; Jessica, 2019)을 고려하여 맨발

로 측정을 통일함으로써 종속 변인으로의 영향을 통제하였다. 모든 대상자는 지지 다리를 기준으로 좌, 우 각각 3번 반복적으로 시행하여, 중심을 잡지 못하거나 넘어진 경우를 실패로 간주하였다. 동작 수행 시 이벤트 설정은 2개로 세분화하였으며, (Figure 3)과 같다.

변인 산출

본 연구에서 동작 수행 변인은 틀르베를 수행하는 지지 다리 측 발목관절 모멘트 및 지면반력이다. 동작 수행 변인들을 측정하기 위하여 18대의 적외선 카메라(Qualisys oqus7+ model, Qualisys 社, Sweden) 및 동기화하여 측정이 가능한 2대의 지면반력 측정 측정기(9287BA model, Kistler 社, Swiss)를 사용하였다. 정확한 측정을 위하여 동작을 수행하는 공간을 중심으로 지면 반력기를 설치하였으며, 2m × 5m × 2m 이내에 18대의 카메라를 설치하였다. 모든 카메라의 높이 및 각도를 동작 범위를 완전히 포함되도록 조정 후 3차원 전역 좌표계(global coordinate system) 설정을 위한 캘리브레이션(calibration)을 실시하였다. 동작 분석에 필요한 반사 마커는 골반(pelvis)을 구성하기 위한 ASIS(Anterior Superior Iliac Spine), PSIS(Posterior Superior Iliac Spine), 천골(Sacrum), 어깨(Shoulder), 팔꿈치(Elbow), 무릎(Knee), 발목(Ankle)관절에 부착하는 관절 마커(Joint Marker) 및 머리(Head), 상체(Trunk), 상완(Upper Arm), 하완(Lower Arm), 대퇴(Thigh), 하퇴(Shank), 발(Foot)에 해당하는 신체 분절에 3~4개 이상 부착하는 추적 마커(Trajectory Marker)로 구성하였다(Figure 4). 18대의 적외선 카메라에 산출된 자료는 컴퓨터로 전송 후 수집되었다. 이 과정에서 모션 캡처 프로그램(QTM : Qualisys Track Manager, SEW)을 사용하여 카메라에서 전송된 자료를 통합하고 수집하였다. 수집된 자료는 생체역학분석프로그램(Visual3d : v5.01, C-Motion Inc., Rockville, MD, USA)에서 본 연구의 동작 수행 변인을 산출하였다. 관절 모멘트는 지지 다리 측 발목관절로 시상면, 관상면, 수평면 값을 확인하였으며, 역동 역학 공식(inverse dynamics equation)을 사용하여 산출된 값은 개인별 체중 × 신장으로 표준화 처리하였다. 지면반력은 지지 다리 측 발이 지면에 닿는 동안 2,000Hz에서 자료를 추출하여 좌·우,

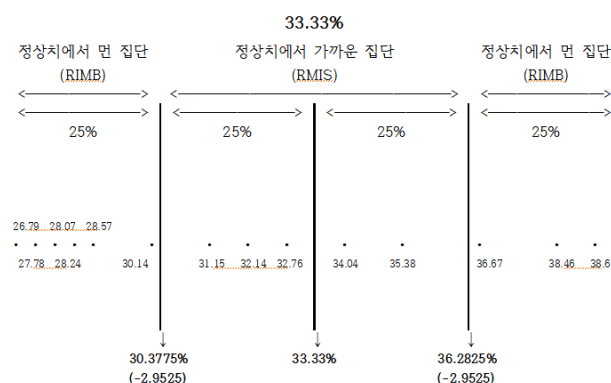


Fig. 2. Group classification

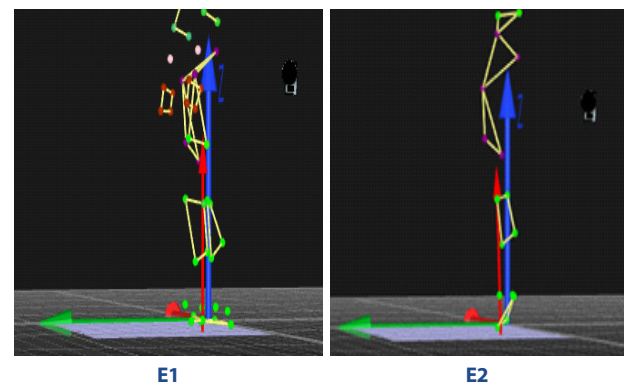


Fig. 3. Event definition

Event1: 지지 다리 측 발뒤꿈치가 지면에서 떨어지기 시작한 시점

Event2: 지지 다리가 최대한 저측 굴곡 되는 시점

Phase1(E1-E2): 지지 다리 측 발뒤꿈치가 지면에서 떨어지기 시작한 시점부터 최대한 저측 굴곡 되는 시점까지 구간

전-후, 수직 방향을 각각 X, Y, Z로 설정하였으며, 개인별 체중으로 표준화 처리하였다. 모든 동작 수행 변인은 3번 수행 시 산출된 값의 평균값을 이용하였다. 모든 변인 산출은 틀르베 동작 구간인 지지 다리 측 발뒤꿈치가 지면에서 떨어지기 시작한 시점(Event1)부터 최대한 저축 굴곡 되는 시점(Event2)까지 동안 최대값을 산출하였다.

통계분석

본 연구의 통계적 분석은 SPSS 26.0 for Window 프로그램을 사용하였으며, 기술 통계를 이용하여 평균과 표준편차를 산출하였다. 통계적 검증을 위하여 발목관절 동측 근력비 집단에 따른 동작 수행(관절 모멘트, 지면반력) 변인 차이를 독립 T 검증을 이용하였으며, 모든 통계분석 유의수준은 $p < .05$ 로 하였다.

연구 결과

발목관절 최대근력

발목 근력 불균형에 따른 RMIS 집단과 RMIB 집단 간 지면반력 차이 검증 결과 저축 굴곡 및 배축 굴곡 최대 근력 모두 두 집단 간 유의한 차이는 나타나지 않았으나, 저축 굴곡 최대근력 결과 RMIB 집단은 RMIS 집단과 비교하여 볼 때 상대적으로 높게 나타났다(Table 2).

Table 2. Peak torque of ankle joint (unit: Nm)

	RMIS (n=5)	RMIB (n=9)	t	p
Plantarflexion	57.4±6.73	63.11±10.98	-1.048	.315
Dorsiflexion	19±2.55	19.67±3.24	-.395	.700

RMIS: the group close to the normal value RMIB: the group far from the normal value



Fig. 4. Marker set

발목관절 모멘트

발목 근력 불균형에 따른 RMIS 집단과 RMIB 집단 간 발목관절 모멘트 차이 검증 결과 X(시상면), Y(관상면) 방향 모든 이벤트 시점에서 유의한 차이가 나타나지 않았으나, Z(수평면) 방향에서 유의한 차이로 RMIS 집단은 내측 회전 모멘트가, RMIB 집단에서는 외측 회전 모멘트가 나타났다($p < .05$)(Table 3).

지면반력

발목 근력 불균형에 따른 RMIS 집단과 RMIB 집단 간 지면반력 차이 검증 결과 X(좌우), Y(전후) 방향 모든 이벤트 시점에서 유의한 차이가 나타나지 않았으나, Z(수직) 방향에서 RMIS 집단과 비교하여 볼 때 RMIB 집단에서 유의한 차이로 더 작게 나타났다($p < .05$)(Table 4).

논의

본 연구에서는 숙련된 발레 무용수의 발목 근력 불균형에 따른 틀르베 동작 수행 시 운동 역학적 변인의 차이를 검증하였다. X(시상면) 방향 발목관절 모멘트 결과 통계적으로 유의한 결과는 나타나지 않았으나, RMIS 집단과 비교하여 볼 때, RMIB 집단에서 저축 굴곡 모멘트가 전반적으로 작게 나타났다.

근력은 관절 모멘트 생성에 영향을 미치는 요인으로서 특히, 최대 근력 수준이 높을수록 동작 수행 시 발휘되는 모멘트 역시 높게 생성된다(Lisee et al., 2019; Samuel et al., 2012). 그러나 본 연구

Table 3. Ankle net joint moment (unit: Nm/kg.m)

		RMIS(n=5)	RMIB(n=9)	t	p
X	P1	-0.2±0.2	-0.13±0.05	-.829	.423
Y	P1	-0.01±0.06	0.01±0.03	-.755	.465
Z	P1	0.02±0.02	-0.01±0.01	2.984	.011*

X(+):Dorsiflexion(-):Plantarflexion, Y(+):Inversion (-):Eversion, Z(+):Internal rotation (-):External rotation. RMIS: the group close to the normal value. RMIB: the group far from the normal value. Data are mean ± standard deviation.

* $p < .05$

Table 4. Ground reaction force (unit: N/BW)

		RMIS (n=5)	RMIB (n=9)	t	p
X	P1	0.04±0.14	0.05±0.02	-.591	.566
Y	P1	-0.08±0.01	0.07±0.03	.911	.380
Z	P1	1.32±0.12	1.13±0.11	2.954	.012*

X(+):Right(-):Left, Y(+):Anterior(-):Posterior, Z(+):Superior (-):Inferior. RMIS:the group close to the normal value. RMIB: the group far from the normal value. Data are mean ± standard deviation.

* $p < .05$

에서 최대 근력 검증 결과 RMIB 집단에서 RMIS 집단과 비교하여 볼 때 유의한 차이는 아니나 높은 저축 굴곡 수준을 확인할 수 있었다. 이는 기존 선행연구 주장들과 상반되는 연구 결과로서 다시 말해서 근력 불균형이 존재하는 RMIB 집단의 경우 주동근 저축 굴곡 최대근력 수준은 높았으나, 동작을 수행할 때 저축 굴곡 모멘트를 효율적으로 발휘하지 못하였음을 의미한다. 이 같은 결과가 나타난 이유에 대해 길항근이 주동근 수축에 미치는 영향과 관련지어 설명할 수 있다. Wierzbicka & Wiegner(1992)는 길항근의 약화가 동작 수행 시 주동근 수축 속도(movement speed)를 감소시켜 결과적으로 운동 수행 능력에 제한적인 요인이 될 수 있다 보고하였으며, Baker & Newton(2005)은 길항근의 약화가 주동근의 근파워(muscle power output) 향상에 제한적인 요인임을 실험적으로 검증하였다. 본 연구의 근력 불균형(RMIB) 집단의 경우 발목관절 정상적인 균형비에서 먼 집단의 경우로 주동근에 대한 길항근의 최대근력이 약하거나 강한 경우로 결과적으로 틀르베 동작 수행 시 주동근 모멘트 발휘에 제한이 가해졌을 것으로 보인다.

동작 수행 시 주동근 힘의 발휘는 발레 동작에 있어서도 중요한 의미가 있으며, 특히, 지지 다리 측 틀르베 동작 시 주동근인 저축 굴곡 모멘트는 동작을 안정적 혹은 효율적으로 수행하기 위한 중요한 요인으로 보고되고 있다(Kim, 2019; Park, 2004; Park et al., 2014; Shim, 2004; Youm, 2005). 이는 발레 무용수가 발목 근력 불균형 측을 지지 다리로 동작을 수행할 때, 효율적으로 힘을 발휘하지 못할 수 있음을 나타낸다.

지면반력 결과 두 집단 간 Z(수직) 방향 시점에서 유의한 차이가 나타났으며($p=.012$), RMIS 집단과 비교하여 볼 때 RMIB 집단에서 Z(수직) 방향 지면반력이 유의한 차이로 작게 나타났다. 틀르베 동작 수행 시 지면반력은 발레 동작의 밸런스를 오랫동안 유지하는 등과 같은 균형을 유지하는데 주요 요인으로서 작용한다(Gwon & Lee, 2005; Park, 2004). 따라서, 지지 다리 측 변인들의 결과를 정리하여 보면 발목 근력 불균형은 저축 굴곡 모멘트 및 지면반력 생성 저하로 인하여 추후 동작 수행의 효율성 및 안정성 측면에서 제한적인 요인이 될 것으로 보이며, 이는 추후 실제 틀르베를 유지하면서 동작을 수행하는 형태의 발레 동작을 적용하여 관계성 직접 검증할 연구가 필요하다.

근력은 지면반력 생성에 영향을 미치는 요인 중 하나로서 최대근력 수준이 높을수록 동작 수행 시 생성되는 지면반력 생성도 높게 나타나는 것으로 보고되고 있다(Haischer et al., 2021; Taishi et al., 2015). 그러나 본 연구에서는 <Table 2>에 제시된 바와 같이 RMIB 집단은 RMIS 집단과 비교하여 볼 때 상대적으로 높은 저축 굴곡 근력 수준을 보여주고 있으며, 이에 반하여 지면반력은 유의한 차이로 낮게 생성되었다. 이는 앞서 언급한 기존 선행연구와 상반되는 연구 결과이다. 안정 시 최대 근력 수준과 동작 수행 시 힘의 활용이라는 차이점에 착안하여 Gwon & Lee(2005)는 발레 동작 수행 시 지지 다리 측 발목 저축 굴곡 근력이 충분히 발휘하지 못하게 될 경우, 결과적으로 지면반력 생성을 제한시킬 수 있다. 따라서, 동작 수행 시 발휘되는 저축 굴곡 힘의 활용이라는 측면에서 볼 때, 저축 굴곡 모멘트 발휘의 영향 역시 배제할 수 없을 것으로 보인다. 본 연구에서 유의한 차이가 나타났던 지면반력 힘의 방향은 Z(수직) 방향으로서 정상적인 보행 패턴에서 저축 굴곡근에 의하여 지면을 밀어내는 과정에서 Z(수직) 방향 지면반력을 생성하며(Hayot et al., 2013), 족저 굴곡 모멘트와 함께 높은 Z(수직)방향 지면반력이 관찰되고 있다

(Elhafez et al., 2019; Kim et al., 2017). 이러한 점에 착안하여 본다면 본 연구의 RMIB 집단의 지면반력 결과는 저축 굴곡 모멘트를 충분히 활용하지 못함으로 나타나는 결과로 판단된다.

Z(수평면) 방향 관절 모멘트 결과 RMIS 집단에서는 내측회전 모멘트, RMIB 집단에서는 외측회전 모멘트로 집단 간 유의한 차이가 나타났다($p<.05$). 이는 발목관절 저축 굴곡 및 배측 굴곡 간 근력 불균형에 따라 틀르베 동작 수행 시 Z(수평면) 방향에서 유의한 움직임 차이가 나타남을 의미한다. 몇몇 연구를 보면 저축 굴곡근과 배측 굴곡근 간 근력 불균형이 내측회전 발목 손상을 유발할 수 있는 요인임을 보고하고 있다. Baumhauer et al.(1995)의 연구에서는 운동선수 145명의 시즌 전 발목관절 저축 굴곡근과 배측 굴곡근 간 최대근력 비율을 산출한 후 시즌 기간 모니터링을 통하여 운동 손상 유발을 관찰한 결과 배측 굴곡근에 비하여 높은 저축 굴곡 근력 수준을 보인 집단에서 발목 내측회전 운동 손상이 나타났다. 또한, Mineta et al.(2017)의 연구에서는 발목 (IG) 불안정 집단의 싱글 레그 테스트(SLT)에서 발목관절 배측 굴곡 활성에 대하여 족저 굴곡 활성이 감소될수록 내측회전을 의미하는 외측 압력 분포가 증가하였다. 위 연구를 정리하면 배측 굴곡에 비하여 저축 굴곡이 약하거나 혹은 배측 굴곡에 비하여 저축 굴곡이 강한 근력 불균형의 경우 내측회전 운동 손상 가능성을 의미한다. 이는 본 연구의 RMIB이 길항근 배측 굴곡근에 비하여 저축 굴곡근이 약하거나 강한 근력 불균형이 존재하는 집단이라는 특성과 관련지어 보면 본 연구의 결과와 상반되는 연구라 볼 수 있다. 그러나 본 연구는 저축 굴곡 움직임을 유도하는 틀르베 동작 수행 시 관찰되는 연구 결과임에 반하여 시즌 모니터링 활동 혹은 싱글 레그 테스트와 같은 저축 굴곡 움직임을 유도하지 않는 동작이라는 차이는 재고해봐야 한다. 그렇지만 발목관절 저축 굴곡 및 배측 굴곡 불균형은 발목 손상 특히, 내측회전과 관련된 발목 손상을 유발할 수 있는 요인과 관련하여 추후 구체적으로 배측 굴곡과 저축 굴곡의 어느 정도의 수치화된 균형비를 적용해야 운동 손상과 관련성이 있는지에 대한 인과관계를 검증한 후속 연구가 필요하다.

결론 및 제언

이상에서 제시한 결과를 종합하여 보면 발레 무용수의 발목 근력 불균형에 따른 틀르베 동작 수행 차이는 힘의 적절한 활용 측면에 있다고 할 수 있다. 발목 근력 불균형이 존재하는 집단에서는 저축 굴곡 모멘트를 충분히 발휘하지 못하였으며, 이에 따라 Z(수직) 방향 지면반력 생성도 낮게 나타났다. 이는 지지 다리 측 힘, 즉, 저축 굴곡 모멘트나 Z(수직) 방향 지면반력을 적절히 활용하지 못하였다는 것을 시사한다. 이로써 향후 등속성 장비를 이용한 발목관절의 저축 굴곡근과 배측 굴곡근 정상적인 균형비라는 수치화된 객관적인 기준치는 현장에서 동작을 효율적으로 수행하기 위한 훈련 프로그램의 목표 설정의 기준 혹은 훈련이 적합한지 점검할 수 있는 훈련 방향을 제시해 줄 수 있다는 점에서 연구의 가치가 있을 것으로 보인다.

CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: EK Chung & BO Lim; Data curation: EK Chung & SH Kim; Formal analysis: EK Chung; Funding acquisition: SH Kim; Methodology: EK Chung & SH Kim; Project administration: BO Lim; Visualization: BO Lim; Writing-original draft: EK Chung; Writing-review & editing: BO Lim

참고문헌

- Baker, D., & Newton, R. U. (2005).** Acute effect on power output of alternating an agonist and antagonist muscle exercise during complex training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(1), 202-205.
- Baumhauer, J. F., Alosa, D. M., Renstrom, A. F., Trevino, S., & Beynnon, B. (1995).** A prospective study of ankle injury risk factors. *The American Journal of Sports Medicine*, 23(5), 564-570.
- Bickle, C., Deighan, M., & Theis, N. (2018).** The effect of pointe shoe deterioration on foot and ankle kinematics and kinetics in professional ballet dancers. *Human Movement Science*, 60, 72-77.
- Bruyneel, A. V., Bertrand, M., & Mesure, S. (2018).** Influence of foot position and vision on dynamic postural strategies during the "grand plie" ballet movement (squatting) in young and adult ballet dancers. *Neuroscience Letters*, 678, 22-28.
- Cho, J. H. (2020).** Analysis of the relationships among toe linear velocity, hip joint angular velocity, ground reaction force and center of mass for the best performance of the ballet movement grand battement devant. *Journal of Korean Society of Dance Science*, 37(1), 19-27.
- Elhafez, S. M., Ashour, A. A., Elhafez, N. M., Elhafez, G. M., & Abdelmohsen, A. M. (2019).** Percentage contribution of lower limb moments to vertical ground reaction force in normal gait. *Journal of Chiropractic Medicine*, 18(2), 90-96.
- Gwon, A. S., & Lee, G. B. (2005).** The research for method of GRF (Ground Reaction Force) on rotational moment in arabesque. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 15(2), 1-10.
- Haischer, M. H., Krzyszkowski, J., Roche, S., & Kipp, K. (2021).** Maximal strength in relation to force and velocity patterns during countermovement jumps. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(1), 83-89.
- Hayot, C., Sakka, S., & Lacouture, P. (2013).** Contribution of the six major gait determinants on the vertical center of mass trajectory and the vertical ground reaction force. *Human Movement Science*, 32(2), 279-289.
- Hong, M. Y. (2004).** Study on the foot deformity and plantar pressure distribution during ambulation in ballet dancer. Doctoral dissertation, DONG-A University.
- Jessica, A. (2019).** Biomechanical comparison of "dead" and "new" pointe shoes in female professional ballet dancers. *The Sport Journal*, 4, 1543-9518.
- Joo, S. Y. (2017).** The immediate effects of one-leg jump rope by wearing 5-toed forefoot shoes on the pressure distribution and the lower extremity alignment during the first position releve demi-point. Master's thesis, Ewha Women University.
- Kang, H. N., Song, I. A., & Choi, S. I. (2007).** The kinematic analysis of ballet motion -Focusing on the motion pas de chat- *The Journal of Korean Society Of Dance Science*, 15, 1-13.
- Kim, E., & Choi, K. (2000).** An Analysis of the Ground Reaction Force of a Rotational Movement in Dance. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 10(1), 259-269.
- Kim, J. M. (2019).** A biomechanical comparison of successful and unsuccessful triple-turn pirouette en dehors trials in ballet. Texas Women University.
- Kim, J. H., & Jung, S. M. (2019).** Effects of strength exercise on H/Q ratio and joint position sense in adult women with imbalanced ipsilateral muscle strength ratio of the knee joint. *Korean Society for Wellness*, 14(1), 363-370.
- Kim, C. J., Lee, K. I., & Hong, W. K. (2011).** The effect of asymmetric muscle force in the lower extremity on dynamic balance on during drop landing. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 21(2), 173-179.
- Kim, H. Y., Shin, H. S., Ko, J. H., Cha, Y. H., Ahn, J. H., & Hwang, J. Y. (2017).** Gait analysis of symptomatic flatfoot in children: An observational study. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 9(3), 363-373.
- Kim, S. J., Seo, K. E., Kim, S. T., & Park, T. J. (2015).** The effect of ration of hamstring and quadriceps on support leg of knee joint moment and ground reaction force during Taekwondo kicking. *The Korea Journal of Sports Science*, 24(2), 1453-1462.
- Lee, J. (2012).** A biomechanical analysis of performing retire passe in ballet. *The Korean Society of Sports Science*, 21(6), 1551-1560.
- Lee, J., Lee, J. H., & Jeong, I. S. (2014).** A kinematic analysis of lower extremity segment during the ballet renverse movement. *Journal of Sports and Leisure Studies*, 56(2), 909-918.
- Lee, S. Y., Kim, S. H., & Lee, J. P. (2009).** The analysis of lower extremities function between ballet dancers and non ballet dancers. *The Korean Society of Sports Science*, 18(2), 1333-1344.
- Lee, Y. J., & Lee, E. H. (1999).** Isokinetic exercise evaluation for ankle joint in ballet dancers. *Journal of Sports and Leisure Studies*, 12, 861-872.
- Lim, J. M., & Yoon, J. R. (2014).** Applied case study on evaluations and diagnosis of isokinetic muscle function in elite collegiate ballerina. *Journal of Sports and Leisure Studies*, 56(2), 959-918.
- Lin, C. F., Su, F. C., & Wu, H. W. (2005).** Ankle biomechanics of ballet dancers in releve en pointe dance. *Research in Sports Medicine*, 13(1), 23-35.
- Lisee, C., Birchmeier, T., Yan, A., & Kuenze, C. (2019).** Associations between isometric quadriceps strength characteristics, knee flexion angles, and knee extension moments during single leg step down and landing tasks after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics*, 70, 231-236.
- Mineta, S., Inami, T., Mariano, R., & Hirose, N. (2017).** High lateral plantar pressure is related to an increased tibialis anterior/fibularis longus activity ratio in patients with recurrent lateral ankle sprain. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 8, 123-131.
- Olaya Mira, N., Hernandez Marulanda, A. F., Guerrero Pena, A. C., Cuartas Torres, D., & Correa Orrego, J. (2019).** Study of ballet dancers during cou-de-pied derriere with demi-plié to piqué

- arabesque. *Journal of Dance Medicine & Science*, 23(4), 150-158.
- Park, H. L. (2014).** *Association between biomechanical variables of ballet "pointe" and its expert evaluation*. Master's thesis, Korea National Sport University.
- Park, K. J. (2004).** The biomechanical analysis on the demi-point balance of the leg segment in modern dance. *Journal of Korean Society for the Study of Physical Education*, 8(4), 283-297.
- Park, Y. S., & Kim, J. H. (2009).** The kinetic analysis of arabesque turn motion in modern dance by upper extremity usage. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 19(3), 457-466.
- Park, H. L., Ryu, J. S., Yoon, S. H., & Park, S. K. (2014).** Ground reaction forces during "pointe" in ballet. 32 *International Conference of Biomechanics in Sports*, 547-549.
- Ruas, C. V., Minozzo, F., Pinto, M. D., Brown, L. E., & Pinto, R. S. (2015).** Lower-extremity strength ratios of professional soccer players according to field position. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(5), 1220-1226.
- Samuel, D., Rowe, P., Hood, V., & Nicol, A. (2012).** The relationships between muscle strength, biomechanical functional moments and health-related quality of life in non-elite older adults. *Age and Ageing*, 41(2), 224-230.
- Schons, P., Da Rosa, R. G., Fischer, G., Berriel, G. P., Fritsch, C. G., Nakamura, F. Y., ... & Peyre-Tartaruga, L. A. (2019).** The relationship between strength asymmetries and jumping performance in professional volleyball players. *Sports Biomechanics*, 18(5), 515-526.
- Seo, S. W., Kwon, J. H., & Lee, H. S. (2017).** Effects of resistance training speed on strength imbalance in middle-aged women. *The Korean Society of Sports Science*, 26(3), 1205-1213.
- Shim, J. H. (2004).** *Mechanical analysis of arabesque motion in ballet*. Doctoral dissertation, Hanyang University.
- Sohn, J. H. (2019).** The effect of knee muscle imbalance on motion of back squat. *Journal of Digital Convergence*, 17(3), 463-471.
- Souza Gontijo, K. N., Tarrago Candotti, C., dos Santos Feijo, G., Ribeiro, L. P. & Fagundes Loss, J. (2015).** kinematic evaluation of the classical ballet step "plié". *Journal of Dance Medicine & Science*. 19(2), 70-76.
- Taishi, T., Kenji T., & Yasuhiro, M., & Tomohiro, O. (2015).** Ground reaction force in sit-to-stand movement reflects lower limb muscle strength and power in community-dwelling older adults. *International Journal of Gerontology*, 9(2), 111-118.
- Wathen, D. (1994).** Exercise selection. In T. R. Baechle (Ed.), *Essentials of strength Training and Conditioning* (p. 425). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Wierzbicka, M. M., & Wiegner, A. W. (1992).** Effects of weak antagonist on fast elbow flexion movements in man. *Experimental Brain Research*, 91(3), 509-519.
- Wilson, M., Lim, B. & Kwon, Y. (2004).** A three-dimensional kinematic analysis of grand rond de jambe en l'air: Skilled versus novice ballet dancers. *Journal of Dance Medicine & Science*, 8(4), 108-115.
- Youm, C. H. (2004).** Comparison of the kinematic analysis of grand battement jete a la seconde in barre between skilled and unskilled ballet majors. *The Korean Society of Dance*, 40(1), 18-32.
- Youm, C. H. (2005).** *Kinetic analysis of the lower extremities for grand battement jete a la seconde in ballet*. Doctoral dissertation, Pusan National University.

발레 무용수 발목 근력 불균형에 따른 운동 역학적 요인 분석

정은교¹, 김성훈¹, 임비오²

¹중앙대학교 박사

²중앙대학교 교수

[목적] 본 연구의 목적은 발레 무용수의 발목 근육 불균형에 따른 롤르베 동작 수행 시 운동 역학적 변인을 분석하는 것이다.

[방법] 본 연구의 대상자($n=14$, 나이: 22.29 ± 1.73 세, 신장: 161.4 ± 5.06 cm, 체중: 51.88 ± 7.51 kg)는 경력 9년의 발레 무용수 14명이다. 동측 근력비는 등속성 측정기($60^\circ/\text{sec}$)를 이용하여 발목관절의 족저 굴곡과 배측 굴곡의 최대값을 이용하여 정상치에 가까운 그룹(RMIS)과 먼 그룹(RMIS)으로 집단을 구분하였다. 운동 역학적 변인으로 발목관절 모멘트와 지면반력을 측정하였다. 데이터 분석은 SPSS 26.0을 사용하였고 통계적 검증은 독립 t-검정을 사용하였다.

[결과] 발레 무용수의 발목관절 근력 불균형에 따른 Z(수직)방향 지면반력은 RMIB군에서 유의하게 낮게 나타났다. 또한, 통계적으로 유의한 차이는 아니었지만 족저굴곡 모멘트는 RMIB군에서 더 낮게 나타났고, Z방향 발목관절 모멘트 발생에서도 유의한 차이가 나타났다.

[결론] 발레 무용수가 동작을 수행할 때 지지 다리 측에서 발생한 힘을 효율적으로 활용하기 위해서는 발목 불균형을 고려한 훈련이 필요하다.

주요어

발목 근력 불균형, 동측 근력비, 발레, 롤르베, 관절 모멘트