KJAB
Korean Journal of Applied Biomechanics 2024; 34(1): 34-44
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2024.34.1.34
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752
ORIGINAL

Relationship of Follow-through Movements to Target Accuracy in Compound Archers

컴파운드 양궁의 팔로우 스루 동작과 사격 정확도의 상관관계

Junkyung Song[1], Kitae Kim[2]

[1]Department of Physical Education, Seoul National University, Seoul, South Korea
[2]Department of Sports Science, Korea Institute of Sport Science, Seoul, South Korea

Received : 15 March 2024
Revised : 29 March 2024
Accepted : 29 March 2024

Corresponding Author
Kitae Kim
Department of Sport Science, Korea Institute of Sport Science (KISS), 727 Hwarang-ro (Gongneung-dong), Nowon-gu, Seoul, 01794, South Korea
Email : 71eh@kspo.or.kr

Objective: This study aimed to investigate how the movements occurring during the follow-through phase after releasing an arrow among elite compound archers, are associated with the arrow impact points on the target.

Method: Nine elite archers performed consecutive compound archery shooting under conditions identical to actual competitions using their own bows and equipment. Motion capture system and force platform were utilized to record the changes in joint positions and center of pressure, respectively. Principal component analysis was employed to identify the patterns in which multidimensional joint positions and COP changes were organized with horizontal and vertical coordinates of arrow impact points. Subsequently, correlation analysis quantified the relationship between individual variables and the coordinates of arrow impacts on the target.

Results: We found a common organizational pattern in which the two axes of the impact point coordinates were grouped into the first two principal components. The movements of the upper and lower limbs following release exhibited opposite patterns in the anterior-posterior axis, with significant correlations observed between the arrow impact points of the horizontal axis and the left shoulder, right elbow, left hip, and both knees. Additionally, the lateral movements induced by the reaction force upon arrow release showed significant associations with the vertical coordinates of the impact points. Particularly, the correlations between the movements of the left shoulder and elbow, as well as the bilateral hip and right knee, were consistently observed among all participants.

Conclusion: These findings implied that the post-release movements could significantly influence the trajectory and impact points of the arrows in compound archery. We suggest that a consistent and controlled movement during the follow-through phase may be more beneficial for optimizing shooting accuracy and precision rather than minimizing movements.

Keywords: Compound archery, Follow-through, Elite archer, Target accuracy

INTRODUCTION

양궁은 대한민국을 대표하는 스포츠로, 매 올림픽에서 다수의 메달을 획득하며 한국인의 큰 사랑을 받아왔다. 양궁의 사격 동작은 활시위를 당기는 '드로잉(drawing)', 과녁을 조준하는 '에이밍(aiming)', 활시위를 놓는 '릴리즈(release)', 그리고

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.

이후 나타나는 '팔로스루(follow-through)'의 순차적 움직임으로 구성되어 있다(Ertan, 2009; Nishizono, Shibayama, Izuta & Saito, 1987). 이러한 동작들은 다른 스포츠와 비교할 때 비교적 정적으로 보일 수 있지만, 정교하고 안정적인 힘을 활에 생산/방출해야 하므로, 높은 수준의 기술과 정교한 자세 제어 능력이 요구된다(Ahmad et al., 2014; Quan, Mohy-Ud-Din & Lee, 2017). 개인별로 다른 활을 사용하면서도 유사한 사격 동작을 취하는 선수들 사이에는 개인의 기술에 따라 전략적 차이가 존재하며, 특히 양궁 사격의 정밀성(precision)은 우수한 경기력을 지닌 엘리트 양궁 선수들의 사격 전략과 경기력에 영향을 미치는 요소를 일반화하는 데 여러 제한을 둔다(Vendrame et al., 2022).

양궁 종목은 크게 리커브와 컴파운드로 구분된다. 올림픽에서는 사수의 힘으로 활을 구부려 화살을 쏘는 리커브 양궁만 정식 종목으로 채택되어 있다. 반면, 아시안게임의 정식 종목인 컴파운드 양궁은 활 끝에 도르래가 장착되어 활시위를 당기는 힘을 보조해주는 기계식 활을 사용하며, 확대 렌즈와 조준기의 사용이 특징이다. 양궁 사격 동작과 경기력의 관계를 규명한 스포츠역학 연구는 대부분 리커브 양궁을 대상으로 진행되었다. 이러한 연구들은 주로 에이밍 - 릴리즈 구간에 주목하였으며, 높은 자세 안정성, 즉 릴리즈 직전 활과 신체의 흔들림을 최소화하는 것이 사격 점수 향상에 중요한 지표로 보고되었다(Keast & Elliott, 1990; Sarro, Viana & De Barros, 2021; Simsek, Cerrah, Ertan & Soylu, 2018; Spratford & Campbell, 2017; Squadrone & Rodano, 1994; Taha et al., 2018; Zawi & Mohamed, 2013). 그러나, 우수한 경기력을 지닌 엘리트 선수의 경우, 더 많은 자세 동요가 높은 점수와 연관될 수 있다는 보고도 있으며(Tinazci, 2011), 이는 에이밍 - 릴리즈 동안 엘리트 양궁 선수의 움직임이 선수 간 사격 기술 수준을 구별하는 데 일반적인 특징으로 삼기 어렵다는 것을 시사한다(Shiang & Tseng, 1997; Stuart & Atha, 1990).

릴리즈 이후 나타나는 팔로스루 국면은 상대적으로 적은 관심을 받아왔지만 최근의 연구는 릴리즈 이후 신체의 흔들림이 사격의 정확도와 관련된 중요한 지표로 활용될 수 있다고 제안되었다(Sarro et al., 2021; Taha et al., 2017). 릴리즈 순간에는 드로잉 동안 활시위에 가해진 힘(draw force)이 짧은 순간에 방출되어 화살을 가속시킨다. 이 힘은 신체에 외력으로 작용하게 되고, 이는 필연적으로 자세 안정성을 교란시키는 원인이 된다(Hennessy & Parker, 1990). 특히 컴파운드 양궁은 기계식 활을 이용한 슈팅 특성으로 인해 화살의 속도가 최대 300 km/h로 210 km/h 수준인 리커브 양궁에 비해 더 빠르며, 이는 컴파운드 양궁에서 릴리즈에 의해 상대적으로 더 큰 섭동이 발생할 수 있음을 시사한다. 또한, 컴파운드 양궁은 리커브 종목 보다 더 짧은 거리에서 사격이 이루어지며, 화살의 궤적이 포물선 형태로 날아가는 리커브 화살과 다르게 직선적으로 날아가 과녁에 도달한다. 이러한 특성은 리커브 종목에 비해 컴파운드 양궁 종목이 바람과 같은 외부 환경의 영향을 적게 받음을 의미한다. 따라서 컴파운드 양궁은 선수의 사격 전략과 움직임이 과녁 점수를 결정짓는데 보다 더 직접적인 영향을 발휘하기 때문에 경기력에 영향을 미치는 엘리트 양궁 선수의 운동학적 특징을 규명하는데 더 유리한 플랫폼이 될 수 있다. 그러나 팔로스루 단계에 대한 연구는 모두 리커브 양궁 상황에서 이루어졌으며, 컴파운드 양궁을 대상으로 한 연구가 필요한 상황이다.

본 연구는 팔로스루 국면에 집중하여, 컴파운드 양궁에서 릴리즈 직후 발생하는 신체의 움직임과 사격 점수와의 관계를 규명하고자 하였다. 엘리트 컴파운드 양궁 선수들이 실험 대상으로 선정되었으며, 선수 개인 간의 차이 보다는 모든 연구 참가자에게서 나타나는 공통적인 패턴과 특성을 확인하는 것에 주목하였다. 이는 향후 컴파운드 양궁 경기력 향상을 위한 트레이닝 방법론 개발에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

METHOD

1. 연구대상

5명의 여성과 4명의 남성으로 구성된 컴파운드 양궁 선수 9명이 본 연구에 참여하였다(나이: 28.44±6.25, 신장: 171.31±6.24, 체중: 69.06±11.07). 모든 연구 참여자에게서 연구 결과에 영향을 미칠 수 있는 신경계 및 근골격계 병력이 없음을 사전에 확인하였다. 실험이 진행되기 전, 참가자들은 세부적인 실험 절차에 대해 숙지했으며 자발적인 연구 참가를 의미하는 연구 참여 동의서를 작성하였다. 모든 연구 과정은 연구윤리심의위원회의 권고에 따라 수행되었다(KISS-23003-2305-03).

2. 실험방법

실험은 외부 환경적 영향을 고려하여 실내 양궁장에서 이루어졌다(Figure 1). 컴파운드 양궁의 경기 규정과 동일하게, 고정된 과녁의 크기는 80 cm였으며 과녁의 거리는 50 m로 설정되었다. 선수 개인의 자연스러운 사격 전략이 활용되도록 실험 동안 개인의 활과 릴리즈 트리거가 이용되었다. 참가자가 사격하는 지점에 지면반력기(Kistler, Winterthur, Switzerland)가 놓여졌으며, 12대의 적외선카메라(Oqus 700, Qualisys™, Sweden)가 운동학적 데이터 획득을 위해 설치되었다. Figure 1과 같이 14 mm 반사 마커 24개가 관절 중심(joint center)의 좌표 산출을 위해 참가자의 신체에 부착되었다(Song, Shin, Kim & Park, 2021). 2개의 마커는 활의 어퍼림(upper bow limb)

과 로어림(lower limb)에 부착되어 릴리즈 시점을 확인하는데 이용되었다. 지면반력기와 모션캡쳐시스템의 샘플링률은 각각 2,000과 200 Hz로 설정되었다.

참가자들은 지면반력기 위에 서서 컴파운드 양궁 경기 규칙과 동일하게 6발씩 12엔드로 총 72발의 사격을 수행하였다. 경기 상황과 동일하게 각 엔드는 180초 안에 사격이 이루어지도록 하였으며, 타이머를 이용해 시간에 대한 피드백을 참가자에게 제공하였다. 비디오카메라(NFS-700, Sony, Japan)가 과녁에 대한 화살 탄착 좌표를 기록하기 위해 과녁 정면에 고정되었으며, 과녁 중앙을 원점으로 하여 mm 단위로 디지타이징된 화살 탄착 좌표가 모니터를 통해 매 사격 마다 참가자에게 제공되었다. 측정이 시작되기 전 충분한 연습 슈팅을 진행하도록 하였으며, 사격 간 휴식 시간이나 자세 등은 최대한 통제하지 않고 실제 경기와 같은 조건 하에 선수 개인의 자연스러운 전략이 활용될 수 있게 하였다.

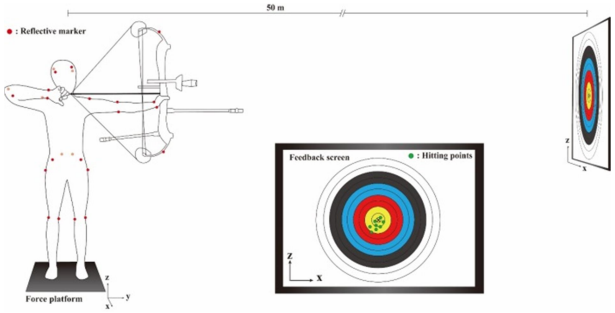

Figure 1. Illustration of experimental setup. Participants stood on a force platform and executed compound archery shots at a distance of 50 meters. Reflective markers were attached to the participants' bodies and bows. The coordinate system was established with the anterior-posterior, medial-lateral, and vertical directions corresponding to the *x*-, *y*-, and *z*-axes, respectively.

3. 자료분석

수집된 모든 3차원 마커 데이터와 지면반력 데이터는 10 Hz의 컷오프 주파수를 지닌 4차 저역 통과 필터(zero-lag 4th order low-pass Butterworth filter)로 필터링 되었다. 이후 마커 데이터는 Visual 3D 프로그램(C-Motion Inc., Germantown, MD)을 통해 발과 발목을 제외한 11개의 3차원 신체 관절 위치 좌표 데이터로 구성되었다. 구체적으로, 머리(HD), 어깨(SD^R, SD^L), 팔꿈치(EB^R, EB^L), 손목(WR^R, WR^L), 고관절(HP^R, HP^L), 무릎(KN^R, KN^L)의 좌표였으며 위첨자로 표현된 R과 L은 각각 신체 우측과 좌측을 의미한다. 지면반력기를 통해 수집된 3차원의 힘과 모멘트 데이터는 다음과 같이 압력 중심(center of pressure, COP)으로 산출되었다(Song, Kim & Park, 2023).

$$COP_x = \frac{M_y + (F_x \cdot d_z)}{F_z}, COP_y = -\frac{M_x + (F_y \cdot d_z)}{F_z},$$

*F*와 *M*은 힘과 모멘트를 의미하며, d_z는 지면반력기 표면과 원점 사이의 수직 거리를 의미한다.

Figure 2는 릴리즈 시점(t_0) 이후 발생하는 신체의 움직임과 COP의 변화를 보여주는 예시이다. t_0는 활의 어퍼림과 로어림에 부착된 마커의 사격 방향(*y* 축)에 해당하는 가속도가 급격히 증가하는 시점으로 정량화 되었다(Ogasawara et al., 2021). 정적인 상태의 신체와 COP 위치는 릴리즈에 의해 급격히 변화하였으며 이후 완만한 변화를 보였다. 이 급격한 변화에 주목하여, 릴리즈 이후에 나타나는 세 축(*x*, *y*, *z*)에 대한 모든 관절 위치와 두 축(*x*, *y*)에 대한 COP의 변화량(Δ)이

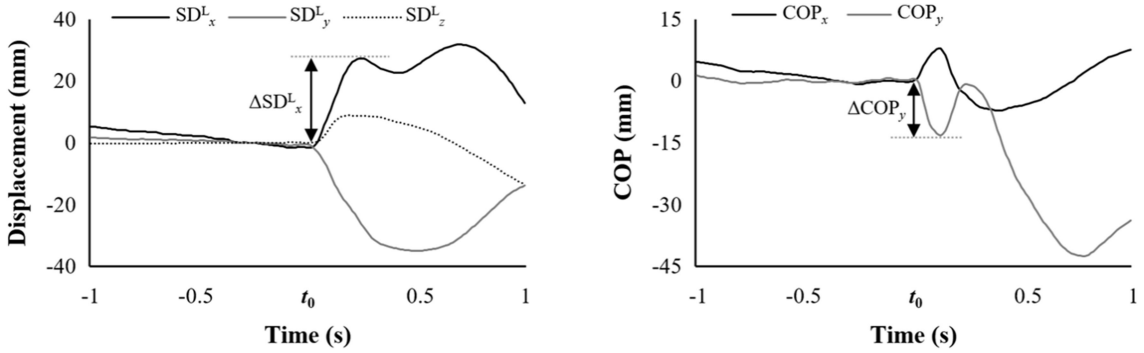

Figure 2. Representative time series data illustrating the changes in joint position and COP after release. The t_0 indicates the time of release. The left figure demonstrates the left shoulder (SD^L) position in *x*-, *y*-, and *z*-axes, while the right figure corresponds to the COP changes along the *x*- and *y*-axes. The changing magnitude (Δvariable) following release is calculated using the difference between the value at t_0 and the subsequent point where the derivative reaches zero for the first time.

Table 1. Structure of first principal component and loading coefficients for all participants

	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6	SUB7	SUB8	SUB9
$Target_x$	**0.63**	**0.77**	**0.48**	**0.62**	**0.45**	**0.67**	**0.47**	**0.70**	**0.53**
$Target_z$	-0.22	0.05	-0.02	0.10	-0.01	-0.23	-0.16	0.12	-0.02
ΔHD_x	**0.62**	0.05	0.13	0.23	**0.68**	-0.09	**0.92**	0.43	**0.71**
ΔHD_y	-0.29	0.12	0.00	0.21	0.16	0.78	0.28	0.22	0.23
ΔHD_z	-0.34	0.44	-0.20	0.20	-0.21	0.44	0.28	0.24	0.13
ΔSD^R_x	0.05	-0.29	-0.37	0.20	0.25	0.23	0.43	0.11	**0.45**
ΔSD^R_y	-0.12	-0.10	0.14	-0.19	-0.01	-0.08	-0.09	0.10	-0.19
ΔSD^R_z	-0.30	0.27	-0.43	0.17	0.21	0.24	**0.84**	**0.50**	0.04
ΔSD^L_x	**0.68**	**0.55**	**0.47**	**0.72**	**0.87**	**0.47**	**0.90**	**0.68**	**0.84**
ΔSD^L_y	-0.16	-0.26	-0.12	-0.13	0.07	0.10	0.00	-0.31	0.23
ΔSD^L_z	-0.41	0.19	0.35	0.38	-0.08	0.40	0.16	-0.01	**0.58**
ΔEB^R_x	**-0.68**	**-0.49**	**-0.48**	**-0.60**	**-0.74**	**-0.53**	**-0.96**	**-0.55**	**-0.77**
ΔEB^R_y	0.13	-0.11	-0.16	-0.16	0.07	**0.48**	**0.77**	0.21	-0.08
ΔEB^R_z	-0.13	0.25	0.26	-0.04	0.37	**-0.51**	**-0.61**	-0.07	**-0.70**
ΔEB^L_x	0.03	**0.86**	0.09	0.21	-0.20	0.42	0.16	0.41	**-0.69**
ΔEB^L_y	-0.21	-0.36	0.02	-0.25	-0.35	0.30	**-0.47**	0.01	0.11
ΔEB^L_z	**-0.51**	0.08	0.04	0.00	**-0.76**	-0.23	-0.31	0.17	**-0.71**
ΔWR^R_x	0.38	0.14	0.08	-0.13	0.01	0.04	**-0.85**	-0.26	-0.03
ΔWR^R_y	-0.42	-0.29	0.34	**-0.49**	-0.14	**-0.56**	**-0.92**	**-0.55**	**-0.71**
ΔWR^R_z	0.17	0.39	0.24	0.04	0.20	0.18	**-0.58**	-0.28	**-0.60**
ΔWR^L_x	-0.32	0.04	-0.51	0.04	**-0.77**	0.03	**-0.92**	-0.23	**-0.67**
ΔWR^L_y	-0.40	-0.25	0.33	-0.28	0.02	0.38	-0.01	0.19	0.16
ΔWR^L_z	**-0.72**	**-0.66**	-0.06	**-0.62**	**-0.60**	-0.32	**-0.69**	-0.22	**-0.47**
ΔHP^R_x	0.04	**-0.69**	**-0.72**	-0.35	**-0.48**	-0.32	**-0.85**	-0.22	-0.13
ΔHP^R_y	0.31	-0.43	-0.07	-0.12	0.19	0.20	-0.37	0.01	-0.15
ΔHP^R_z	-0.04	**-0.57**	-0.04	**0.64**	-0.38	0.16	-0.19	**0.48**	0.06
ΔHP^L_x	**0.78**	**0.85**	**0.63**	**0.75**	**0.83**	**0.47**	**0.90**	**0.81**	**0.71**
ΔHP^L_y	**0.56**	**0.49**	0.27	**0.56**	**0.46**	**0.47**	0.14	0.17	0.19
ΔHP^L_z	0.01	0.39	0.06	**0.69**	0.40	**0.80**	-0.42	0.42	**0.52**
ΔKN^R_x	**-0.66**	**-0.88**	**-0.85**	**-0.78**	**-0.90**	**-0.86**	**-0.90**	**-0.67**	**-0.49**
ΔKN^R_y	**0.66**	-0.16	0.07	-0.15	-0.20	0.13	-0.20	-0.21	-0.07
ΔKN^R_z	-0.14	**-0.51**	0.07	0.29	-0.33	**-0.61**	**0.47**	0.15	0.01
ΔKN^L_x	**0.94**	**0.96**	**0.72**	**0.93**	**0.87**	**0.88**	**0.89**	**0.92**	**0.76**
ΔKN^L_y	**0.88**	**0.87**	**0.51**	**0.75**	**0.81**	**0.72**	**0.71**	0.39	**0.56**

Table 1. Structure of first principal component and loading coefficients for all participants (Continued)

	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6	SUB7	SUB8	SUB9
ΔKN^{L}_{z}	**0.80**	**0.66**	0.37	**0.82**	**0.71**	**0.88**	0.25	**0.48**	**0.73**
ΔCOP_{x}	**0.46**	**0.48**	0.12	**0.83**	0.20	**0.60**	0.27	**0.58**	**0.49**
ΔCOP_{y}	0.00	0.13	**0.46**	-0.36	**-0.84**	**-0.82**	-0.27	**-0.54**	0.00

Loading coefficients over |0.45| are shown in bold. Superscripts R and L indicate right and left side, respectively. Subscripts *x*, *y*, and *z* refer to the *x*-, *y*-, *z*-axis, respectively

Table 2. Structure of second principal component and loading coefficients for all participants

	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6	SUB7	SUB8	SUB9
$Target_{x}$	-0.16	0.14	0.13	-0.11	0.20	0.06	-0.05	-0.08	0.20
$Target_{z}$	**0.48**	**0.54**	**0.59**	**0.78**	**0.49**	**0.69**	**0.66**	**0.81**	**0.66**
ΔHD_{x}	0.41	**-0.56**	-0.03	-0.13	0.26	-0.23	-0.04	-0.43	-0.15
ΔHD_{y}	**-0.75**	**0.77**	**-0.67**	-0.60	**-0.55**	-0.35	**-0.85**	-0.36	**-0.47**
ΔHD_{z}	**-0.75**	**0.69**	**0.48**	**-0.80**	**-0.78**	0.11	**-0.75**	0.38	-0.33
ΔSD^{R}_{x}	-0.38	-0.41	0.10	-0.35	0.16	-0.30	-0.38	-0.25	0.12
ΔSD^{R}_{y}	**-0.61**	**0.59**	0.05	**-0.71**	**-0.67**	**-0.67**	-0.44	**-0.58**	-0.42
ΔSD^{R}_{z}	-0.41	**0.83**	0.39	-0.43	**-0.45**	-0.14	0.07	-0.25	-0.09
ΔSD^{L}_{x}	-0.03	**-0.57**	-0.14	0.00	0.06	-0.19	-0.05	-0.20	-0.22
ΔSD^{L}_{y}	**-0.95**	**0.46**	**-0.92**	**-0.78**	**-0.93**	**-0.80**	**-0.84**	**-0.61**	**-0.84**
ΔSD^{L}_{z}	0.34	**-0.56**	0.24	-0.14	0.30	0.33	-0.15	-0.41	**0.45**
ΔEB^{R}_{x}	-0.25	**0.75**	0.30	0.15	-0.09	-0.29	0.04	-0.06	0.22
ΔEB^{R}_{y}	-0.23	**-0.60**	**-0.83**	-0.14	0.15	**-0.48**	**-0.47**	-0.38	**-0.63**
ΔEB^{R}_{z}	0.13	**0.91**	**0.68**	**0.46**	0.04	-0.14	**0.60**	-0.19	0.11
ΔEB^{L}_{x}	0.02	-0.02	0.37	-0.13	-0.04	0.05	0.01	-0.25	0.05
ΔEB^{L}_{y}	**-0.90**	**-0.54**	**-0.97**	**-0.86**	**-0.88**	**-0.84**	**-0.82**	**-0.67**	**-0.85**
ΔEB^{L}_{z}	-0.20	**-0.79**	**-0.55**	0.15	-0.39	**-0.73**	0.21	-0.20	-0.35
ΔWR^{R}_{x}	-0.19	**0.87**	**0.66**	-0.28	0.09	-0.24	0.27	-0.43	-0.09
ΔWR^{R}_{y}	0.00	**0.49**	**0.54**	0.13	**-0.61**	**-0.51**	0.15	-0.32	-0.33
ΔWR^{R}_{z}	0.11	**0.86**	**0.77**	**0.48**	0.11	0.06	**0.65**	0.02	0.17
ΔWR^{L}_{x}	**-0.60**	**0.60**	-0.06	**-0.57**	-0.34	-0.10	-0.11	**-0.52**	-0.04
ΔWR^{L}_{y}	-0.33	-0.38	**-0.76**	**-0.77**	**-0.92**	**-0.83**	**-0.86**	**-0.60**	**-0.80**
ΔWR^{L}_{z}	-0.26	-0.10	**-0.77**	**-0.61**	**-0.64**	**-0.83**	**-0.61**	**-0.73**	**-0.73**
ΔHP^{R}_{x}	-0.05	-0.27	-0.23	-0.01	0.11	-0.07	-0.07	-0.14	-0.06
ΔHP^{R}_{y}	**0.57**	**0.48**	**0.88**	**0.84**	**0.78**	**0.81**	**0.86**	**0.72**	**0.75**
ΔHP^{R}_{z}	0.10	-0.39	**-0.82**	**-0.47**	**-0.55**	**-0.68**	**-0.77**	**-0.63**	**-0.73**

Table 2. Structure of second principal component and loading coefficients for all participants (Continued)

	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6	SUB7	SUB8	SUB9
ΔHP^{L}_{x}	0.27	-0.04	0.28	0.30	0.32	-0.07	-0.03	0.11	-0.11
ΔHP^{L}_{y}	**0.56**	**0.45**	**0.87**	**0.67**	**0.72**	**0.73**	**0.93**	**0.64**	**0.60**
ΔHP^{L}_{z}	0.00	-0.12	**0.59**	0.07	**0.51**	0.36	**0.75**	**0.74**	0.38
ΔKN^{R}_{x}	-0.25	-0.15	-0.18	-0.10	-0.04	0.11	0.15	0.16	-0.01
ΔKN^{R}_{y}	**0.60**	**0.47**	**0.89**	**0.88**	**0.82**	**0.90**	**0.90**	**0.67**	**0.47**
ΔKN^{R}_{z}	-0.09	0.06	-0.39	-0.44	-0.41	**-0.57**	-0.29	-0.36	0.05
ΔKN^{L}_{x}	0.16	-0.05	0.30	0.11	0.29	-0.09	0.01	0.09	-0.01
ΔKN^{L}_{y}	0.31	0.10	**0.68**	**0.49**	**0.48**	**0.48**	**0.60**	**0.55**	**0.47**
ΔKN^{L}_{z}	0.24	0.07	**0.67**	-0.02	0.40	0.03	**0.60**	**0.59**	-0.02
ΔCOP_{x}	-0.14	0.03	0.38	-0.01	0.20	-0.36	**-0.50**	-0.03	0.23
ΔCOP_{y}	**-0.76**	0.11	**-0.67**	**-0.47**	0.09	-0.31	**-0.52**	**-0.49**	-0.01

Loading coefficients over |0.45| are shown in bold. Superscripts R and L indicate right and left side, respectively. Subscripts *x*, *y*, and *z* refer to the *x*-, *y*-, *z*-axis, respectively

산출되었다. t_0 이후에 나타나는 위치 데이터의 미분값(속도)이 처음으로 0이 되는 지점을 확인하였으며, 이 지점의 값과 t_0 시점에 값의 차이로 변화량이 정량화 되었다(e.g., ΔSD^{L}_{x} and ΔCOP_{y} in Figure 2). 최종적으로, 각 참가자 별 총 72발의 사격 시도에서 획득된 과녁에 대한 화살의 2차원 탄착 좌표($Target_{x}$, $Target_{z}$), 릴리즈 시점 이후에 나타난 신체 관절 중심의 움직임 변화량, 그리고 COP의 변화량이 본 연구의 종속변인으로 산출되었으며, 이후 통계 분석에 활용되었다.

4. 자료처리

산출된 변인의 통계적 분석을 위해 SPSS 24.0 (IBM, Armonk, NY, USA)이 이용되었다. 본 연구의 목적은 릴리즈 이후 팔로스루 국면에서 나타나는 신체의 움직임 패턴과 컴파운드 양궁 경기력의 연관성을 살펴보는 것이다. 반복적인 사격 시도 동안 획득된 다차원의 종속변인들, 즉 3차원의 관절 움직임(ΔHD, ΔSD^{R}, ΔSD^{L}, ΔEB^{R}, ΔEB^{L}, ΔWR^{R}, ΔWR^{L}, ΔHP^{R}, ΔHP^{L}, ΔKN^{R}, ΔKN^{L})과 2차원 COP (ΔCOP_{x}, ΔCOP_{y})의 변화가 과녁 탄착 좌표($Target_{x}$, $Target_{z}$)와 갖는 연관성을 확인하기 위해 요인회전(varimax rotation)을 동반한 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 수행하였다. 분석은 각 연구 참가자에 대해 별도로 수행되었으며, 72회의 사격 시도에 대해 산출된 총 37개의 변인이 주성분분석의 요소로 구성되었다. 주성분분석을 통해 과녁의 수평, 수직축 탄착 좌표와 함께 그룹화되는 주성분(PC)의 요소를 확인하였다. 이후, 해당 주성분에서 모든 참가자들에 걸쳐 공통적으로 높은 로딩 값을 보이는 각 요소들에 대해 탄착 좌표와 이변량 상관분석(Pearson correlation analysis)을 수행하여 상관계수 R을 산출하였다. 모든 검정 유의수준은 α = 0.05로 설정하였다.

RESULTS

1. 주성분분석 결과

주성분분석 결과, Kaiser 규칙에 의거한 1보다 큰 고유값(eigenvalue)을 지닌 주성분(PC)의 수는 전체 참가자에 걸쳐 4~7개(평균 5.56±1.13)로 나타났으며 평균 87.45±1.17%의 설명력을 보였다. 이는 주성분분석에 적용된 37개 요소 변인의 차원이 효과적으로 축소됨을 의미한다.

주목할 결과는 모든 참가자에 걸쳐 첫 번째와 두 번째 PC에 화살 탄착점의 수평($Target_{x}$) 및 수직축($Target_{z}$) 좌표가 포함되었다는 것이다. Table 1과 Table 2는 전체 참가자의 PC1과 PC2에 그룹화된 요소 변인들의 구성을 보여주며, 유의미한 로딩(>|0.45|)을 지닌 변인들은 굵은 글씨로 강조되었다(Song et al., 2023). 모든 참가자에게서 공통적으로 나타난, $Target_{x}$와 동일한 PC 내에 조직화된 변인은 SD^{L}_{x}, EB^{R}_{x}, HP^{L}_{x}, KN^{R}_{x}, KN^{L}_{x} 였다(Table 1). 탄착점의 수직축 좌표인 $Target_{z}$는 모든 참가자에게서 SD^{L}_{y}, EB^{L}_{y}, HP^{R}_{y}, HP^{L}_{y}, KN^{R}_{y}와 함께 동일한 PC에 할당됨을 확인하였다(Table 2). 지면 압력 중심(COP)의 경우, COP_{x}는 9명 중 6명의 참가자에게서 $Target_{x}$와 함께

Table 3. Correlation coefficients between target displacement for the *x*-axis and variables within the same PC

	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6	SUB7	SUB8	SUB9
ΔSD^{L}_{x}	0.39†	0.42‡	0.36†	0.43‡	0.40‡	0.26*	0.31*	0.49‡	0.16
ΔEB^{R}_{x}	-0.40†	-0.29*	-0.08	-0.40†	-0.29*	-0.14	-0.36†	-0.36†	-0.06
ΔHP^{L}_{x}	0.36†	0.60‡	0.47‡	0.49‡	0.52‡	0.44†	0.36†	0.49‡	0.11
ΔKN^{R}_{x}	-0.30*	-0.69‡	-0.47‡	-0.46‡	-0.43‡	-0.52‡	-0.39†	-0.49‡	-0.11
ΔKN^{L}_{x}	0.55‡	0.68‡	0.47‡	0.58‡	0.51‡	0.65‡	0.31*	0.64‡	0.15
ΔCOP_{x}	0.48‡	0.31*	0.30*	0.49‡	0.44‡	0.53‡	0.12	0.44‡	0.25*

Double dagger (‡): $p < 0.001$; single dagger (†): $p < 0.01$; single asterisks (*): $p < 0.05$

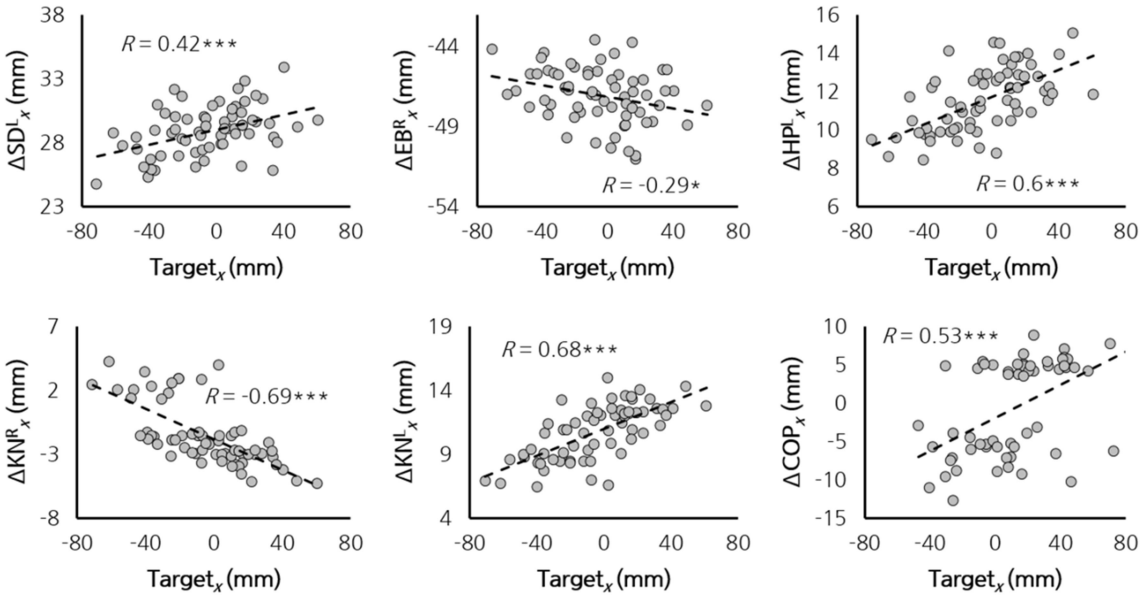

Figure 3. Scatter plots illustrating the relationship of $Target_x$ with changes in joint position and COP for a representative subject. The best-fit linear regression lines with coefficients of correlation (*R*) are presented in each plot.
***: $p < 0.001$; **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$.

조직화 됨을 보여주었다. 반면 COP_y는 5명의 참가자에게서 $Target_z$와 같은 PC에 그룹화 되었다.

2. 상관분석 결과

주성분분석에서 수평($Target_x$) 및 수직($Target_z$) 축의 화살 탄착 좌표와 함께 유의미하게 그룹화되는 관절 위치와 COP의 변화량은 이변량 상관분석을 통해 각 변인과 탄착 좌표와의 상관관계로 정량화 되었다. Table 3에는 모든 참가자들에 대해 $Target_x$와 주요 변인의 상관분석에서 나타난 상관계수와 유의수준이 제시되었다. ΔEB^{R}_{x}, ΔKN^{R}_{x}는 $Target_x$와 유의한 부적 상관관계를 보였으며, ΔSD^{L}_{x}, ΔHP^{L}_{x}, ΔKN^{L}_{x}, ΔCOP_{x}는 $Target_x$와 정적 상관관계를 보였다(Figure 3).

Table 4는 $Target_z$에 해당하는 상관계수와 그에 대응하는 통계적 유의수준을 보여준다. ΔSD^{L}_{y}, ΔEB^{L}_{y}, ΔCOP_{y}는 $Target_z$와 유의한 부적 상관관계를 보였으며, ΔHP^{R}_{y}, ΔHP^{L}_{y}, ΔKN^{R}_{y}는 $Target_z$와 유의한 정적 상관관계를 보였다(Figure 4).

DISCUSSION

본 연구는 엘리트 컴파운드 양궁 선수를 대상으로 릴리즈 이후 팔로스루 동안 나타나는 움직임이 양궁의 경기력, 즉

Table 4. Correlation coefficients between target displacement for the *z*-axis and variables within the same PC

	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6	SUB7	SUB8	SUB9
ΔSD^{L}_{y}	-0.42‡	-0.11	-0.53‡	-0.52‡	-0.37†	-0.54‡	-0.38†	-0.52‡	-0.54‡
ΔEB^{L}_{y}	-0.43‡	-0.42†	-0.55‡	-0.69‡	-0.47‡	-0.62‡	-0.42†	-0.52‡	-0.52‡
ΔHP^{R}_{y}	0.21	0.39†	0.52‡	0.62‡	0.21	0.43†	0.59‡	0.58‡	0.45‡
ΔHP^{L}_{y}	0.06	0.51‡	0.58‡	0.54‡	0.13	0.33*	0.58‡	0.50‡	0.33†
ΔKN^{R}_{y}	0.10	0.46‡	0.52‡	0.64‡	0.30*	0.55‡	0.63‡	0.44‡	0.27*
ΔCOP_{y}	-0.39†	0.07	-0.45‡	-0.32†	0.09	-0.12	-0.36†	-0.45‡	0.14

Double dagger (‡): $p < 0.001$; single dagger (†): $p < 0.01$; single asterisks (*): $p < 0.05$

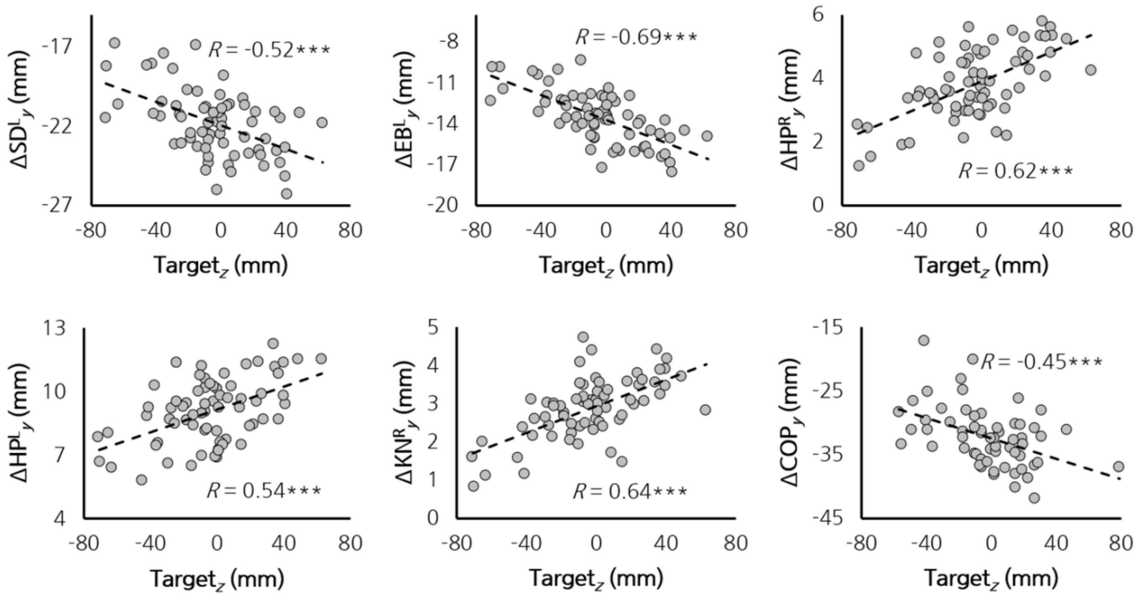

Figure 4. Scatter plots illustrating the relationship of $Target_z$ with changes in joint position and COP for a representative subject. For each plot, the best-fit linear regression lines with coefficients of correlation (*R*) are presented.
***: $p < 0.001$; **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$.

과녁에 대한 화살의 탄착점과 어떤 관계를 지니는지 확인하고자 하였다. 아마추어와 프로 선수와 같이 기량 수준이 차이나는 선수들 간의 양궁 사격 전략과 경기력에 미치는 영향은 여러 선행연구를 통해 밝혀져 왔다(Azhar, Sharma, Sharma & Tanwar, 2021; Ertan, Kentel, Tümer & Korkusuz, 2003; Ertan, Soylu & Korkusuz, 2005; Shinohara & Urabe, 2018; Simsek et al., 2018). 그러나 경기력이 일정 수준에 도달한 엘리트 선수의 경우, 특히 에이밍 - 릴리즈 단계에서 활용되는 선수 간 사격 특성의 차이로 인해 일반화 할 수 있는 최적의 사격 전략에 대한 명확한 합의를 이루기 어렵다. 예를 들어, 일부 엘리트 선수들은 더 높은 자세 안정성을 위해 에이밍 동안 신체의 움직임을 최소화 하는 반면(Spratford & Campbell, 2017; Zawi & Mohamed, 2013), 다른 선수들은 활의 방향(orientation)을 안정화 하기 위해 오히려 신체의 움직임을 활용하는 전략을 선택한다(Serrien, Witterzeel & Baeyens, 2018). 또한 드로잉 이후 짧은 에이밍 시간이 더 높은 사격 정확성과 연관된다는 보고(Taha, Mat-Jizat, Omar & Suwarganda, 2016; Tinazci, 2011)와 대조적으로 에이밍 시간이 길어질 수록 사격의 정확성이 향상됨을 보고하는 사례도 있다(Callaway, Wiedlack & Heller, 2017). 엘리트 양궁 선수들 사이에 나타나는 이러한 에이밍 - 릴리즈 전략의 차이는 훈련 및 시합 상황에 적용할 수 있는 경기력 향상 전략 및 지침을 개발하는 데 어려움을 준다. 따

라서 본 연구에서는 릴리즈 이후 팔로스루에서 나타나는 움직임에 초점을 맞추고, 참가한 모든 엘리트 컴파운드 양궁 선수들 사이에서 공통적으로 나타나는 패턴을 파악하는 데 주안점을 두었다.

연구에서 나타난 주목할 결과는 주성분분석을 통해 확인된 것으로, 릴리즈 이후 급격히 변화하는 신체 관절 중심점의 위치와 압력 중심(COP)의 변화(Δvariable in Figure 2)가 수평 및 수직축 과녁 탄착점과 일관된 패턴으로 그룹화 되었다는 것이다. 이는 모든 참가자에 걸쳐 유사하게 나타나며, 전체 분산에서 가장 큰 설명력을 가진 첫 번째와 두 번째 주성분(principal component)에 해당 변화들이 포함되었다는 사실은 릴리즈 이후 신체 움직임의 변동성이 과녁의 탄착 위치에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 수평축 과녁 탄착점은 동일한 인체의 전-후 축(x-axis)에 대한 좌측 어깨(ΔSD^L_x), 우측 팔꿈치(ΔEB^R_x), 좌측 고관절(ΔHP^L_x), 양측 무릎(ΔKN^R_x, ΔKN^L_x)의 움직임과 함께 그룹화 되었으며(Table 1), 수직축 과녁 탄착점은 사격 방향인 좌-우 방향(y-axis)의 좌측 어깨(ΔSD^L_y), 좌측 팔꿈치(ΔEB^L_y), 양측 고관절(ΔHP^R_y, ΔHP^L_y), 우측 무릎(ΔKN^R_y)의 움직임이 함께 그룹화 되었다(Table 2). 한편, COP의 경우 좌-우 방향에 대한 COP 움직임(ΔCOP_y)은 수직축 탄착점과, 전-후측 COP 변화(ΔCOP_x)는 수평축 탄착점과 각각 그룹화 되는 경향을 보였지만, 모든 참가자에게서 일관되게 나타나진 않았다.

Table 3과 4에 나타난 화살 탄착 좌표의 변동성과 함께 그룹화 되는 개별 요소의 상관분석은 탄착 지점에 영향을 미치는 릴리즈 이후 움직임 패턴을 구체적으로 보여준다. 활시위를 당기는 드로잉 과정은 어깨의 수평 외전(horizontal abduction)을 담당하는 후면 삼각근을 포함한 견갑골 주변 근육의 작용으로 달성된다(Kolayiş & Ertan, 2016). Draw force가 급격히 방출되는 릴리즈에 의해 팔로스루 동안 우측 팔꿈치는 수평 외전 방향(음의 x-축 방향)으로 움직임이 발생하게 된다(Figure 3). 이 우측 팔꿈치의 움직임이 화살의 수평축 탄착 지점과 부적 상관관계를 지니며, 따라서 릴리즈 이후 발생하는 팔의 수평 외전을 적절한 양으로 제어하는 것이 화살의 수평 방향 변위를 최소화 하는 전략이 될 수 있음을 시사한다. 수평 탄착 좌표와 정적인 상관관계를 보인 사지의 근위(proximal) 관절, 좌측 어깨와 고관절의 움직임은 우측 팔꿈치의 움직임과 반대인 전방(양의 x-축 방향)을 향해 나타났다. 또한, 좌측과 우측 무릎의 전-후측 움직임은 서로 반대되는 패턴으로 나타났으며, 좌측 무릎은 수평 탄착점과 정적인 상관관계를, 우측 무릎은 팔꿈치의 움직임과 유사하게 부적 상관관계를 보였다. 이 좌우측 신체에서 관찰된 반대 방향의 움직임은 릴리즈에 의한 섭동을 보상하여 자세 안정성을 유지하기 위한 전략으로 사료된다. 한 방향으로 일관된 변위가 발생한 관절 위치에 비해 전-후 모든 방향의 변동성을 보인 COP의 움직임(ΔCOP_x in Figure 3)은 팔로스루 동안 나타난 이러한 자세적 보상 작용을 반영한다. 한편, 전-후측 COP 움직임과 대조적으로 좌-우측 COP의 움직임(ΔCOP_y)은 화살이 발사되는 반대 방향인 우측으로만 일관되게 나타났다. 좌-우측은 릴리즈로 인한 반력(reaction force)이 강하게 작용하는 방향으로 이를 반영하여 좌측 어깨 및 팔꿈치 또한 follow through 동안 일관되게 우측으로 변위가 발생했다(Figure 4). 이 우측 변위와 수직축에 대한 탄착점은 부적 상관관계를 보여주었다. 즉, 릴리즈 이후 반력에 의해 화살이 발사되는 반대 방향으로 신체의 이동이 크다면 화살은 과녁에 대해 상대적으로 높은 위치에 탄착 되는 것이다. 따라서 반력에 의한 신체의 움직임 크기를 적절하게 제어하는 것이 일관된 화살 탄착군을 형성하는데 기여할 것이다. 대조적으로, 양측 고관절과 오른쪽 무릎은 좌측(양의 y 축 방향)으로 움직이는 것이 확인되었으며, 탄착의 수직축 좌표와 정적 상관관계를 보였다. 이러한 보상적 움직임에도 불구하고 상지에 비해 상대적으로 작은 하지의 움직임은 COP의 우측 변위를 완전히 상쇄하기에는 불충분 하여, 일정한 COP의 변위를 유발한 것으로 보인다.

양궁 퍼포먼스에 관한 대부분의 연구들은 릴리즈 이전에 나타나는 궁수의 움직임에 주목해 왔다. 그러나 양궁 코칭에서는 릴리즈 후의 전략 또한 양궁 사격 주기의 중요한 부분으로 강조하고 있으며, 릴리즈 이후 움직임이 짧게 끊어지지 않고, 신체가 자연스럽고 부드럽게 움직이는 반응이 나타나야 한다고 보고한다(Lee & de Bondt, 2005). 또한 에이밍 동안 자세 흔들림 보다 릴리즈 이후 팔로스루 동안 나타나는 조절되지 않은 자세적 동요가 사격 결과를 결정하는 더 중요한 요인이라 보고되기도 했다(Mohamed & Azhar, 2012). 이는 본 연구에서 발견된 주요 결과와 유사한 맥락을 지닌다. 본 연구에서 나타난 과녁 탄착점에 유의한 영향을 미치는 신체의 움직임은 관절 마다 그 방향과 크기가 다르지만 선수들 간 일관된 패턴을 보였다. 또한, 해당 관절의 위치 변화와 탄착점이 갖는 상관관계는, 팔로스루 동안 단순히 움직임 자체를 최소화 하고 제한하는 것보다, 적정량의 일관되고 조절된 움직임이 중요하다는 점을 시사한다. 예를 들어 <Figure 3>의 전-후 축에 대한 좌측 어깨의 경우 팔로스루 동안 전방 움직임이 증가하면 탄착점이 우측으로 치우치지만, 움직임이 너무 작다면 좌측으로 탄착점이 이동할 수 있다. 특히 좌측 어깨와 고관절의 움직임은 탄착점의 수평 및 수직축 변동성과 공통적으로 상관관계를 갖는 주요 관절로 고려될 수 있다. 중추신경계가 과잉된 자유도(redundant degrees of freedom)를 지닌 인체의 다중 관절을 독립적으로 제어하기 어려움으로(d'Avella, Saltiel & Bizzi, 2003), 실제 컴파운드 양궁 현장에서 릴리즈 이후 나타나는 개별 관절의 움직임을 통제하기 보다는, 좌측 어깨와 고관절의 움직임에 주목하는 것이 사격의

정확성과 정밀성(precision)을 개선하는데 유용할 전략이 될 것이다.

CONCLUSION

본 연구는 컴파운드 양궁 선수들을 대상으로 화살을 발사하는 릴리즈 이후 팔로스루 동안 나타나는 신체의 움직임이 과녁에 대한 화살 탄착점과 어떻게 연관되는지를 규명하고자 수행되었다. 연구 결과, 릴리즈에 의한 상지와 하지의 움직임은 전-후 축을 중심으로 반대 패턴으로 나타났으며, 좌측 어깨와 우측 팔꿈치, 좌측 고관절과 양측 무릎이 모든 참가자에 걸쳐 수평축에 대한 화살 탄착점의 변동성과 유의한 상관관계를 보였다. 또한, 화살이 발사되는 힘의 반력으로 인한 좌-우 방향의 움직임은 탄착점의 수직축 좌표와 유의하게 연관되었다. 특히 좌측 어깨와 팔꿈치, 양측 고관절과 우측 무릎 움직임의 연관성은 모든 참가자에게서 공통적으로 나타났다. 이러한 결과들을 릴리즈 이후 발생하는 신체 움직임이 화살의 궤적과 탄착점에 뚜렷한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

더불어, 본 연구는 최적의 사격 정확성과 정밀성을 위해 팔로스루 동안 나타나는 움직임을 최소화하는 것보다 적정량의 일관되고 조절된 움직임이 더 효과적임을 제안한다. 이러한 결론을 바탕으로, 연구 결과를 현장에서 활용할 때 몇 가지 유의해야 할 점이 있다. 첫째, 본 연구는 컴파운드 양궁을 대상으로 진행되었기 때문에 리커브 양궁 상황에서 적용에 유의해야 한다. 컴파운드 양궁에서 화살은 리커브 양궁에 비해 더 빠른 속도로 발사되고 화살의 궤적이 더 직선적인 특징을 지닌다. 또한 궁수는 릴리즈 트리거를 활용하기 때문에 이러한 차이로 인해 리커브 양궁에서의 팔로스루 패턴은 다르게 나타날 수 있다. 둘째, 연구 대상자들은 기술 수준이 높은 엘리트 선수들이었기 때문에 이들의 특성을 유소년 선수와 아마추어를 포함한 양궁 선수 전체로 일반화하는 것은 어려울 수 있다. 이러한 점들을 고려하면, 추후에는 리커브 양궁 종목과의 차별점 및 기량 수준이 다른 참가자들 간에 나타나는 특성을 이해하기 위한 연구가 요구된다.

REFERENCES

Ahmad, Z., Taha, Z., Hassan, M. H. A., Hisham, M. A., Johari, N. H. & Kadirgama, K. (2014). Biomechanics measurements in archery. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, *6*, 762-771.

Azhar, S., Sharma, S., Sharma, S. & Tanwar, T. (2021). EMG activity of transversus abdominis, multifidus and co-contraction index in different phases amongst varied level archers: A cross-sectional study. *Polish Journal of Sport and Tourism*, *28*(1), 19-23.

Callaway, A. J., Wiedlack, J. & Heller, M. (2017). Identification of temporal factors related to shot performance for indoor recurve archery. *Journal of Sports Sciences*, *35*(12), 1142-1147. doi: 10.1080/02640414.2016.1211730.

d'Avella, A., Saltiel, P. & Bizzi, E. (2003). Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior. *Nature Neuroscience*, *6*(3), 300-308. doi: 10.1038/nn1010.

Ertan, H. (2009). Muscular activation patterns of the bow arm in recurve archery. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *12*(3), 357-360. doi: 10.1016/j.jsams.2008.01.003.

Ertan, H., Kentel, B., Tümer, S. T. & Korkusuz, F. (2003). Activation patterns in forearm muscles during archery shooting. *Human Movement Science*, *22*(1), 37-45. doi: 10.1016/S0167-9457(02)00176-8.

Ertan, H., Soylu, A. R. & Korkusuz, F. (2005). Quantification the relationship between FITA scores and EMG skill indexes in archery. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *15*(2), 222-227. doi: 10.1016/j.jelekin.2004.08.004.

Hennessy, M. P. & Parker, A. W. (1990). Electromyography of arrow release in archery. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, *30*(1), 7-17.

Keast, D. & Elliott, B. (1990). Fine body movements and the cardiac cycle in archery. *Journal of Sports Sciences*, *8*(3), 203-213. doi: Pii 79028400110.1080/02640419008732146.

Kolayiş, İ. E. & Ertan, H. (2016). Differences in activation patterns of shoulder girdle muscles in recurve archers. *Pamukkale Journal of Sport Sciences*, *7*(1), 25-34.

Lee, K. & de Bondt, R. (2005). Total Archery. *GimPo-City: Samick Sports Co., Ltd.*

Mohamed, M. N. & Azhar, A. H. (2012). Postural sway and shooting accuracy of skilled recurve archers. *Movement Health & Exercise*, *1*(1).

Nishizono, H., Shibayama, H., Izuta, T. & Saito, K. (1987). *Analysis of archery shooting techniques by means of electromyography.* Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive.

Ogasawara, T., Fukamachi, H., Aoyagi, K., Kumano, S., Togo, H. & Oka, K. (2021). Archery Skill Assessment Using an Acceleration Sensor. *Ieee Transactions on Human-Machine Systems*, *51*(3), 221-228. doi: 10.1109/Thms.2020.3046435.

Quan, C. H., Mohy-Ud-Din, Z. & Lee, S. (2017). Analysis of Shooting Consistency in Archers: A Dynamic Time Warping Algorithm-Based Approach. *Journal of Sensors*, 2017. doi:

Artn 747121710.1155/2017/7471217.

Sarro, K. J., Viana, T. D. & De Barros, R. M. L. (2021). Relationship between bow stability and postural control in recurve archery. *European Journal of Sport Science*, *21*(4), 515-520. doi: 10.1080/17461391.2020.1754471.

Serrien, B., Witterzeel, E. & Baeyens, J. P. (2018). The uncontrolled manifold concept reveals that the structure of postural control in recurve archery shooting is related to accuracy. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, *3*(3), 48.

Shiang, T. Y. & Tseng, C. J. (1997). *A new quantitative approach for archery stability analysis*. Paper presented at the International Society of Biomechanics Congress.

Shinohara, H. & Urabe, Y. (2018). Analysis of muscular activity in archery: a comparison of skill level. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *58*(12), 1752-1758. doi: 10.23736/S0022-4707.17.07826-4.

Simsek, D., Cerrah, A. O., Ertan, H. & Soylu, R. A. (2018). Muscular Coordination of Movements Associated with Arrow Release in Archery. *South African Journal for Research in Sport Physical Education and Recreation*, *40*(1), 141-155.

Song, J., Kim, K. & Park, J. (2023). Multi-muscle Synergies of Postural Control in Self- and External-Triggered Force Release During Simulated Archery Shooting. *Journal of Motor Behavior*. doi: 10.1080/00222895.2023.2187336.

Song, J., Shin, N., Kim, K. & Park, J. (2021). Changes in intersegmental stability during gait in patients with spastic cerebral palsy. *Gait and Posture*, *88*, 264-271. doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.06.002.

Spratford, W. & Campbell, R. (2017). Postural stability, clicker reaction time and bow draw force predict performance in elite recurve archery. *European Journal of Sport Science*, *17*(5), 539-545. doi: 10.1080/17461391.2017.1285963.

Squadrone, R. & Rodano, R. (1994). *Multifactorial analysis of shooting archery*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive.

Stuart, J. & Atha, J. (1990). Postural consistency in skilled archers. *Journal of Sports Sciences*, *8*(3), 223-234. doi: Pii 79028400310.1080/02640419008732148.

Taha, Z., Haque, M., Musa, R. M., Abdullah, M. R., Maliki, A. B. H. M., Mat-Rashid, S. M., Kosni N. A. & Adnan, A. (2017). Analysis of biological and mechanical related performance parameters of Malaysian senior youth archers. *Advances in Human Biology*, *7*(3), 137-141.

Taha, Z., Mat-Jizat, J. A., Abdullah, M. A., Musa, R. M., Abdullah, M. R., Ibrahim, M. F. & Shaharudin, M. A. H. (2018, March). Integrated multi sensors and camera video sequence application for performance monitoring in archery. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *319*(1), 012-017.

Taha, Z., Mat-Jizat, J. A., Omar, S. F. S. & Suwarganda, E. (2016). Correlation Between Archer's Hands Movement While Shooting and Its Score. *Procedia Engineering*, *147*, 145-150.

Tinazci, C. (2011). Shooting dynamics in archery: A multi-dimensional analysis from drawing to releasing in male archers. *Procedia Engineering*, *13*, 290-296.

Vendrame, E., Belluscio, V., Truppa, L., Rum, L., Lazich, A., Bergamini, E. & Mannini, A. (2022). Performance assessment in archery: a systematic review. *Sports Biomechanics*. doi: 10.1080/14763141.2022.2049357.

Zawi, K. & Mohamed, M. (2013). Postural sway distinguishes shooting accuracy among skilled recurve archers. *The Online Journal of Recreation and Sport*, *2*(4), 21-28.