KJAB

Korean Journal of Applied Biomechanics 2023; 33(4): 175-184
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2023.33.4.175
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

Investigation of Biomechanical Factors in Track and Field Javelin Performance: A Multidimensional Analysis of Predictive Variables through Multiple Regression Analysis

육상 창던지기 기록에 미치는 운동학적 요인의 탐색: 다차원적 다중회귀를 활용한 성과 예측 변수 분석

Ho-Jong Gil[1], Jin Joo Yang[2], Jong Chul Park[3], Young Sun Lee[4], Jae Myoung Park[5]

[1]Fila Advanced Science and Technology Center, FILA Holdings, Busan, South Korea
[2]Prosthetics and Orthotics Center, VHS Medical Center, Seoul, South Korea
[3]Department of Marine Sport, Pukyoung National University, Busan, South Korea
[4]Department of Physical Education, Korea National Sport University, Seoul, South Korea
[5]Department of Youth Guidance and Sport Education, Korean National Sport University, Seoul, South Korea

Received : 24 November 2023
Revised : 08 December 2023
Accepted : 08 December 2023

Corresponding Author
Jae Myoung Park
Department of Youth Guidance and Sport Education, Korea National Sport University, 1239, Yangjae-daero, Songpa-gu, Seoul, 05541, South Korea
Email : koreajm85@knsu.ac.kr

Objective: The purpose of this study is to investigate the effects of human motion and javelin kinematics during the energy transfer in javelin throwing on records, and to provide evidence-based training insights for athletes and coaches to enhance records.

Method: Three javelin throw athletes (age: 22.67 ± 0.58 years, height: 178.33 ± 7.37 cm, weight: 83.67 ± 1.15 kg) were recruited for this study. Each athlete attempted ten maximum record trials, and the kinematic data from each performance were analyzed to determine their influence on the records. The Theia3d Markerless system was used for motion analysis.

Results: Key factors were modeled and identified at each moment. In E1, main variables were COM Y (β 8.162, p<.05) and COM velocity Z (β -72.489, p<.05); in E2, COM X (β -17.604, p<.05); in E3, COM X (β -18.606, p<.05), COM velocity Y (β 38.694, p<.05), and COM velocity X (β 66.323, p<.05). For the javelin throw dynamics in E3, key determinants were Attitude angle and Javelin velocity in the Y-axis.

Conclusion: The study reveals that controlled vertical movement, center of mass management during braking, and enhanced pelvic rotation significantly improve javelin throw performance. These kinematic strategies are critical for record enhancement in javelin throwing.

Keywords: Javelin throwing, Biomechanical factors, Multiple regression analysis, Performance enhancement

Copyright © 2023 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.

INTRODUCTION

창던지기 종목은 창을 이용한 투사체 운동으로서, 다른 투척 종목인 원반, 포환, 해머의 세 종목과는 다르게 짧은 시간 내에 많은 힘을 발생시켜 속도가 중요한 역할을 하며(Young, 2007), 창을 던지기 전의 운동 에너지와 던진 후의 다양한 변수들에 의해 기록이 정해지게 된다. 창던지기 동작은 35 m의 정해진 구역 내에서 3단계의 동작인 도움닫기, 크로스오버 스텝, 릴리즈로 구분하여 이루어진다. 주동발이 오른발일 경우, 도움닫기는 왼발 착지부터 오른발 착지까지, 크로스오버 스텝은 오른발에서 마지막 왼발 지지발 착지까지, 릴리즈는 왼발 지지발 착지부터 창의 릴리즈 순간까지를 의미한다. 이 중 도움닫기와 릴리즈 구간의 동작이 선수의 기록에 영향을 크게 미치는 것으로 보고되고 있다(Antti, Komi, Korjus, Navarro & Gregor, 1994; Kim, Ryu & Park, 2013).

창던지기 경기에서 기록에 영향을 미치는 동작은 릴리즈 전의 지지발 착지와 릴리즈 동작이다. 던지기 동작은 근위 분절에서 원위 분절로 가속을 통하여 최대 운동 효과를 얻을 수 있는데, 특히 릴리즈 시점에서 하지로부터 상지를 거쳐 창에 전달되는 것이 중요하다. 릴리즈 시점에서의 창의 투사 각도, 투사 속도, 투사 높이가 기록에 가장 큰 영향을 미친다고 연구되고 있으며(Lee, 2002; Komi & Mero, 1985; Bartlett & Best, 1988; Park & Yoon, 2010), 그 중 투사 속도가 경기력에 미치는 영향이 높은 것으로 보고되었다(Morriss, Bartlett & Flowler, 1997). 릴리즈 시점에서 창의 세 가지 각도 요인도 경기력 향상에 중요한 요소로 작용되는데, 창 자체 각도인 자세각(attitude angle), 투사 벡터를 나타내는 투사각(release angle), 자세각과 투사각의 차이인 공격각(attack angle)이 있으며, 공격각이 0도에 가까울 때 효율적인 동작이 나타나고 기록에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Kim, 2014).

투사체의 각도, 속도, 높이와 같은 투사체의 요인뿐만 아니라 릴리즈 시 팔꿈치 관절의 선속도와 각 움직임에서 나타나는 각 단계에서의 선수 자세에 대한 운동학적 분석이 기록에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Best, Bartlett & Morriss, 1993; Komi & Mero, 1985). Best et al. (1993)의 연구에 따르면 투사 속도를 높이는 방법으로 도움닫기와 크로스오버 스텝에서 발생한 에너지를 창으로 전달하는 것과 지지발 착지 시에 허리에서 발생된 토크 운동량을 일관성 있게 창으로 전달하는 것에 있으며, Komi & Mero (1985)는 지지발 착지 과정에서 무릎각을 최대한 신전하여 착지 과정에서 발생하는 충격량을 창으로 전달할 수 있어 경기 기록을 향상시키는데 긍정적인 영향을 미친다고 보고하였다. 이 과정에서 운동역학적인 키네틱 체인과 신체에서 일어나는 회전이 중요하게 나타나는데, 다양한 연구들에서 창의 진행방향인 시상면에 초점을 맞추어 연구되어지고 있다(Park & Yoon, 2010; Lee, 2002). 하지만 투창의 경우 릴리즈 순간에 지면을 지지하며 회전 동작이 이루어지는 다차원적 움직임이 나타나기 때문에 동작의 수평면, 시상면, 관상면을 각각 살펴볼 필요가 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 창던지기 시 거리 기록에 영향을 미치는 주요 운동학적 요인들을 3차원의 각 방향 별로 살펴보고, 가장 핵심적인 역할을 하는 변수 조합의 모델을 선정하여 그 영향 정도를 분석하는 것이다. 또한, 추출된 과학적 근거를 바탕으로, 훈련에 적용 가능한 기능적 설명과 함께 선수 및 지도자를 위한 기초자료를 제공하는 것을 목표로 한다.

METHOD

1. 연구대상

본 연구에 참여한 연구대상자는 2023년도 현재 대한육상경기연맹 창던지기 선수로 등록되어 있는 인원 중, 최근 6개월 이내에 근골격계 질환 또는 수술 경험이 없는 3명(남자 2명, 여자 1명)으로 선정하였다(나이: 22.67±0.58 years, 신장: 178.33±7.37 cm, 몸무게: 83.67±11.15 kg, 기록: 49.94±9.23 m). 모든 연구참여자들은 실험에 대한 설명을 자세히 듣고 동의서를 작성한 후 실험에 참여하였다.

2. 실험절차

본 연구에서는 창던지기 기록에 미치는 다양한 운동학적 요인을 확인하기 위하여, 비디오 추적식 딥러닝 알고리즘이 적용된 Theia3D Markerless (Theia3D Markerless Inc., Canada) 시스템을 사용하였다(Figure 1). 이때, 창던지기의 운동학적 요인은 별도로 Kwon3D 3.1 프로그램을 사용하여 추출하였다. 운동방향 및 공간 설정을 위해서 창던지기 주로의 전방을 +Y축으로, 주로의 우측을 +X축으로, 수직방향을 +Z축으로 하는

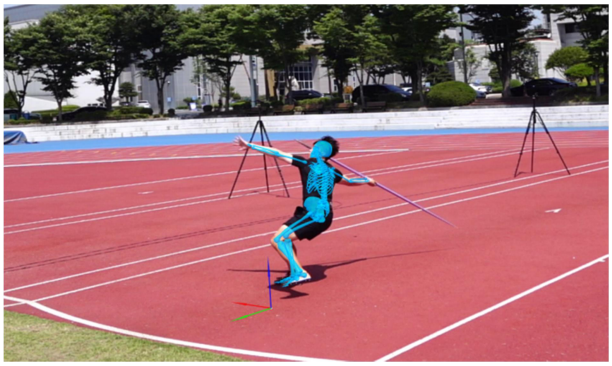

Figure 1. Theia3D and global coordination system camera setup for javelin throw

전방위 3차원 공간(Global Coordination System [GCS])을 설정하였다. 영상 수집은 10대의 비디오 카메라(DSC-RX0 M2, Sony Corporation, Tokyo) 및 10대의 CCB-WD1 Control Box (Sony Corporation, Tokyo)를 이용하여 120 Hz의 촬영 속도로 1920 × 1080 p 해상도에서 수집하였다.

CCB-WD1의 video sync 기능, bullet time 기능으로 영상을 동기화(sync)하였으며, 수집된 영상은 크게 두 가지 부분으로 분리하여 분석하였다. 첫째, 도움닫기로부터 창던지기 완료까지 인체의 움직임만을 해석한 Theia3D 범주, 둘째, 던지는 순간의 창의 운동학적 요인만을 해석한 릴리즈 전-후 10 frame 윈도우에 대한 Kwon3D 범주다. 두 가지 분석 처리는 동일한 영상과 길이 및 벡터공간(동일 object에 의한 calibration)을 사용하지만, 동작과 창을 분리 해석하여 결과를 도출하였다.

실험 절차는 Mondo track과 잔디밭의 경계선에 위치한 조주로에서 선수에게 개별적으로 50분간의 워밍업 시간을 제공한 후, 10번의 최대 기록에 도전하도록 지시하였다. 이때, 선수의 연속적인 수행에 따른 피로를 줄이기 위해서, 각각 선수 별 순차적으로 앞의 선수가 시기를 완료한 후(동작완료, 기록측정 완료) 선수의 자발적 시간 차이를 두고 진행하도록 하였다. 창의 기록 측정은 육상 창던지기 공인 심판 자격을 갖춘 심판원과 보조자에 의해서 계측되었다.

3. 자료처리 및 변인

선수들은 각 10회의 자유로운 시기를 받고 최대 거리 기록 도전을 실시하였으며, 모든 횟수에 대해서 분석 처리하였다. 이때 각 기록에 기여한 전신의 운동학적 요인을 살펴보다. 주요 독립변수인 운동학적 변인은 양측의 발목 관절, 무릎 관절, 고관절, 허리 관절, 목 관절, 어깨 관절, 팔꿈치 관절, 팔목 관절로 관절계(Joint Coordination System [JCS])에 대한 방향별 각도 및 각속도를 살펴보았다. 또한, 상대적인 관절 각도뿐만 아니라 공간상의 위치 포지셔닝을 확인하기 위해서 추가로 머리 분절, 몸통 분절, 골반 분절, 양측 발 분절의 분절계(Segment Coordination System [SCS]) 각도 및 각속도를 GCS 기반으로 살펴보았다(Figure 2).

창의 운동학적 변인은 창을 던지는 순간으로 한정하였다. 첫째, 창의 벡터가 지면 Y축과 이루는 시상면에서의 자세각1 (Attitude angle1; Figure 3, a)을 보았으며, 둘째, 창의 벡터가 Y축과 이루는 수평면에서의 자세각2(Attitude angle2; Figure 3, b)를 살펴보았다. 셋째, 창의 중심 벡터가 전방 Y축과 Z축

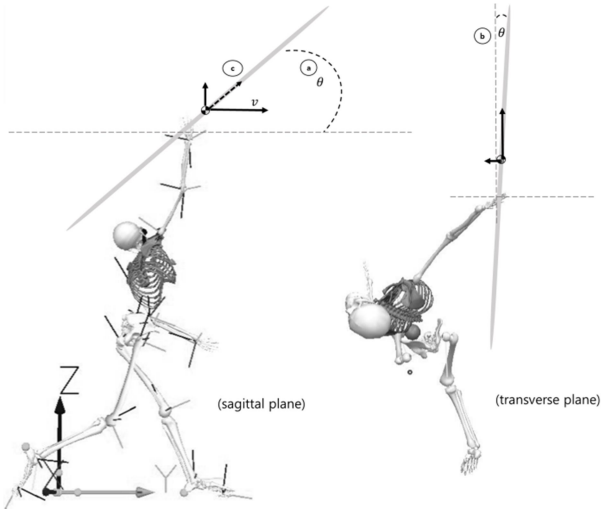

Figure 3. Angle definitions of kinematic variables at javelin release moment

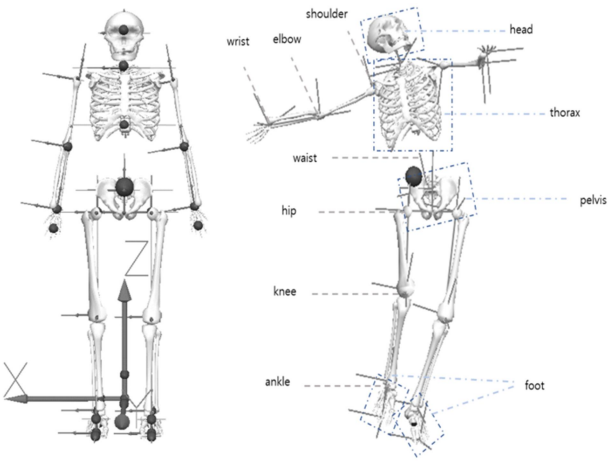

Figure 2. Human anatomical model for Joint and segment system definitions

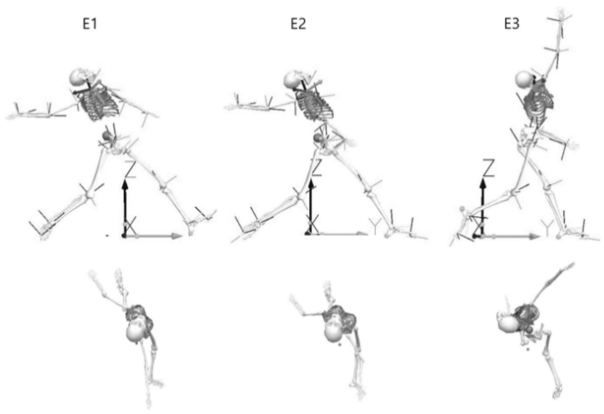

Figure 4. Events configuration in kinetic energy transfer with braking

으로 움직이는 속도에 대한 절대각(resultant angle)인 투사각(release angle; Figure 3, c)을 살펴보았으며, 넷째, 자세각1과 투사각의 차이를 살펴본 공격각(Attack angle)을 보았다. 또한, 창 분절 중심의 수평, 수직 속도를 각각 포함하여 최종 창의 운동학적 변인으로 설정하였다.

분석 범위는 선수가 도움닫기 한 후, 제동을 거는 앞발의 뒤꿈치가 지면에 닿는 순간을 Event1 (E1), 앞발이 완전히 지면에 닿는 순간을 Event2 (E2), 창을 놓는 순간을 Event3 (E3)으로 설정하였으며(Figure 4), 각 순간의 어떤 요인들이 기록에 유의미한 영향을 미치는지 알아보았다.

데이터 처리는 1차적으로 Theia3D를 통해서 관절 및 분절 좌표계를 생성하였으며, Visual3D로 전환하여 구간 설정, 운동학적 변인(각도, 각속도) 계산을 실시하였다. 마지막으로 Python 3.10 버전을 이용하여 각 구간의 계산 및 통계 처리를 하였다.

4. 통계처리

인체의 다양한 운동학적 변인 중 어떠한 요인들이 기록에 영향을 미치는지 확인하기 위하여, 각 이벤트 순간의 방향 별 운동학적 변수와 기록과의 다중회귀 분석(Multiple Regression Analysis)을 실시하였다. 이때, 전진 선택법(forward selection)을 사용하여 의미 있는 요인들이 선택되도록 하였으며, 종합적으로 선택된 변수 뭉치(bunch)에 대한 다양한 통계 수치들을 추출하였다. 모든 통계의 계산은 Python 3.10 (Zelle, 2004) 환경하에서 분석하였다. 배열 연산 및 처리는 Pandas 라이브

Table 1. Results of forward selection adopted variables in E1

Performance		Variables	*B*	SE	*β*	*t*	*p*	VIF	Pearson *r*
Record	Sagittal and M/L axis factors	Constant	1.589	3.766		0.422	.677		
		WAIST_ANGVEL_X	0.025	0.012	0.001	1.993	.058	2.577	0.714
		RFOOT_ANGLE_X	-0.193	0.030	-0.011	-6.523	.000**	4.725	-0.864
		NECK_ANGLE_X	0.445	0.084	0.063	5.268	.000**	5.769	0.905
		LWRIST_ANGVEL_X	0.018	0.005	0.000	3.851	.001*	3.963	-0.786
		LFOOT_ANGLE_X	0.335	0.092	0.081	3.640	.001*	2.307	0.665
		R=0.983, R^2=0.983, Adjusted R^2=0.979, F=224.955, p=.000							
	Coronal and F/B axis factors	Constant	5.756	6.854		0.840	0.410		
		RKNEE_ANGLE_Y	0.910	0.131	0.209	6.951	.000**	5.085	0.908
		WAIST_ANGVEL_Y	-0.036	0.009	-0.001	-3.873	.001*	5.058	-0.785
		CENTER_OF_MASS_VELOCITY_Y	2.965	1.202	8.162	2.467	.022*	2.985	0.653
		NECK_ANGLE_Y	-0.319	0.131	-0.085	-2.439	.023*	3.783	-0.781
		LANKLE_ANGLE_Y	0.855	0.250	0.376	3.418	.002*	5.077	-0.186
		R=0.984, R^2=0.984, Adjusted R^2=0.978, F=187.417, p=.000							
	Transverse and S/I axis factors	Constant	64.101	3.421		18.739	.000**		
		PELVIS_ANGLE_Z	0.516	0.037	0.037	14.131	.000**	1.942	0.921
		RHIP_ANGVEL_Z	0.028	0.004	0.000	7.566	.000**	2.752	0.332
		CENTER_OF_MASS_VELOCITY_Z	-13.523	3.680	-72.489	-3.675	.001*	3.605	-0.315
		R=0.960, R^2=0.960, Adjusted R^2=0.955, F=208.483, p=.000							

B: Unstandardized coefficient, SE: Standard error of *B*, β: Standardized coefficient, VIF: Variance Inflation Factor, M/L: Medial/Lateral, F/B: Forward/Backward, S/I: Superior/Inferior, X: Sagittal angle/movement, Y: Coronal angle/movement, Z: Horizontal angle/movement
*: p<.05, **: p<.001

러리(버전 2.1.1; McKinney, 2011)를 이용하였으며, 수치 연산은 NumPy(버전 1.21.0; Van Der Walt, Colbert & Varoquaux, 2011)를 통해 계산하였다. 단계적 선택에서 의미 있는 변수의 선택은 Statsmodels(버전 0.14.0; Seabold & Perktold, 2010) 라이브러리를 이용하여 변수 채택 및 모델링 하였으며, 이때, 다중 공선성 문제를 줄이기 위해서 VIF (Variance Inflation Factor)를 계산한 후, 6 미만의 값들로 채택된 모델만을 추출하였다. 또한, 다중회귀 분석 및 변수 최종 선택 과정에는 선형 회귀 모델과 특성 선택에 Scikit-learn(버전 1.3.1; Pedregosa et al., 2011) 라이브러리의 RFEC (Recursive Feature Elimination with Cross-Validation) 모듈을 활용하였다. 이러한 과정을 통해서 Forward Selection 방식을 적용하여 각 주요 순간에서 기록에 미치는 주요 변인들의 최종 모델을 선정하였다.

RESULTS

1. 제동 발 뒤꿈치 착지 순간(E1)의 운동학적 변인에 대한 다중회귀 결과

창던지기 시 제동이 시작되는 전방 착지발의 뒤꿈치가 닿는 순간의 운동학적 요인 중, 기록에 유의미하게 영향을 미치는 방향 별 주요 변수 모델의 채택 결과는 <Table 1>과 같다. 우선, 시상면의 요인에서 5가지의 요인들(Waist angular velocity, Right foot angle, Neck angle, Left wrist angular velocity, left foot angle)이 기록에 영향을 주었으며(Adjusted R^2=0.979, p<.000), 관상면에서 5가지의 요인들(Right Knee angle, Waist angular velocity, Center of mass velocity, Neck

Table 2. Results of forward selection adopted variables in E2

Performance		Variables	*B*	SE	*β*	*t*	*p*	VIF	Pearson *r*
Record	Sagittal and M/L axis factors	Constant	41.611	4.791		8.685	0.000		
		RFOOT_ANGLE_X	-0.230	0.030	-0.013	-7.693	.000**	3.395	-0.868
		LELBOW_ANGLE_X	-0.099	0.020	-0.003	-4.907	.000**	4.344	-0.371
		RSHOULDER_ ANGLE_X	0.155	0.041	0.012	3.784	.001*	3.286	0.318
		CENTER_OF_ MASS_X	-4.667	1.612	-17.604	-2.895	.008*	2.290	-0.546
		LELBOW_ANGVEL_X	0.043	0.016	0.002	2.691	.013*	2.114	0.674
		R=0.978, R^2=0.978, Adjusted R^2=0.973, F=174.023, p=.000							
	Coronal and F/B axis factors	Constant	18.295	4.705		3.889	0.001		
		THORAX_ ANGVEL_Y	-0.063	0.015	-0.001	-4.110	.000**	5.951	-0.945
		RSHOULDER_ ANGLE_Y	-0.330	0.054	-0.033	-6.150	.000**	3.914	-0.810
		LANKLE_ANGVEL_Y	-0.055	0.011	-0.001	-5.027	.000**	4.369	-0.809
		RFOOT_ANGVEL_Y	0.016	0.005	0.000	3.167	.004*	1.296	-0.001
		RELBOW_ANGLE_Y	-0.507	0.234	-0.373	-2.170	.041*	1.401	-0.098
		R=0.981, R^2=0.981, Adjusted R^2=0.975, F=192.751, p=.000							
	Transverse and S/I axis factors	Constant							
		PELVIS_ANGLE_Z	0.451	0.068	0.035	6.615	.000**	4.166	0.904
		LHIP_ANGLE_Z	-0.682	0.236	-0.238	-2.886	.008*	2.528	-0.607
		R=0.947, R^2=0.947, Adjusted R^2=0.938, F=111.455, p=.000							

B: Unstandardized coefficient, SE: Standard error of *B*, β: Standardized coefficient, VIF: Variance Inflation Factor, M/L: Medial/Lateral, F/B: Forward/Backward, S/I: Superior/Inferior, X: Sagittal angle/movement, Y: Coronal angle/movement, Z: Horizontal angle/movement
*: p<.05, **: p<.001

angle, Left ankle angle)이 Adjusted R^2=0.984, p<.000의 수준에서 영향을 주었다. 특히, 신체 중심의 전방 속도의 표준화된 β 값이 8.162 (p<.05)을 나타내면서, 기록에 양적으로 유의미하게 영향을 주는 것으로 나타났다. 수평면에서는 3가지의 요인들(Pelvis angle, Right hip angular velocity, Center of mass velocity)이 기록에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 (Adjusted R^2=0.955, p<.001), 특히 신체 중심 수직 속도가 β -72.489 (p<.05)의 값을 보이며 기록 저하에 크게 작용하는 것으로 나타났다.

2. 제동 발 전체 착지 순간(E2)의 운동학적 변인에 대한 다중회귀 결과

창던지기 시 가장 강한 제동과 전신의 체중이 실리는 전방 발의 전체 착지 순간(E2)의 운동학적 요인 중, 기록에 유의미하게 영향을 미치는 방향 별 변수들의 채택 결과는 <Table 2>와 같다. 시상면의 요인은 Right foot angle, Left elbow angle, Right shoulder angle, Center of mass, Left elbow angular velocity의 요인들로 Adjusted R^2=0.973, p<.001 수준에서 기록에 영향을 주는 것으로 선정되었다. 이때, 신체 중심의 좌우 위치 변화가 기록에 부정적 영향을 주는 것으로 나타났다 (β -17.604; p<.05). 또한, 관상면에서는 Thorax angular velocity, Right shoulder angle, Left ankle angular velocity, Right foot angular velocity, Right elbow angle 이 다섯 가지 요인이 Adjusted R^2=0.975, p<.001 수준에서 기록에 영향을 주었다. 수평면에서의 요인은 Pelvis angle, Left hip angle 요인들이 Adjusted R^2=0.938, p<.001 수준에서 기록에 유의미한 영향을 주는 것으로 나타났다.

Table 3. Results of forward selection for human body kinematic variables in E3 moment

Performance		Variables	*B*	SE	*β*	*t*	*p*	VIF	Pearson *r*
Record	Sagittal and M/L axis factors	Constant	61.449	2.382		25.802	.000**		
		WAIST_ANGLE_X	-0.702	0.099	-0.158	-7.126	.000**	2.676	-0.868
		HEAD_ANGLE_X	-0.274	0.043	-0.030	-6.356	.000**	2.103	-0.105
		CENTER_OF_MASS_X	-5.140	1.498	-18.606	-3.431	.002*	2.386	-0.591
		CENTER_OF_MASS_VELOCITY_X	9.511	3.189	66.323	2.982	.007*	2.913	-0.704
		R=0.981, R^2=0.981, Adjusted R^2=0.976, *F*=193.757, *p*=.000							
	Coronal and F/B axis factors	Constant	12.172	7.782		1.564	0.131		
		RANKLE_ANGLE_Y	-0.260	0.083	-0.036	-3.139	.005*	4.524	-0.885
		CENTER_OF_MASS_VELOCITY_Y	9.190	1.773	38.694	5.183	.000**	2.244	0.707
		NECK_ANGLE_Y	0.179	0.046	0.022	3.865	.001*	1.831	0.368
		RHIP_ANGVEL_Y	0.033	0.016	0.001	2.077	.049*	3.698	0.757
		R=0.979, R^2=0.979, Adjusted R^2=0.973, *F*=175.746, *p*=.000							
	Transverse factors	Constant	33.076	3.631		9.110	0.000		
		RANKLE_ANGLE_Z	0.157	0.029	0.011	5.339	.000**	3.059	0.870
		PELVIS_ANGVEL_Z	0.018	0.007	0.000	2.682	.013*	4.606	0.841
		WAIST_ANGLE_Z	-0.243	0.105	-0.062	-2.329	.029*	2.705	-0.814
		R=0.982, R^2=0.982, Adjusted R^2=0.979, *F*=265.543, *p*=.000							

B: Unstandardized coefficient, SE: Standard error of *B*, β: Standardized coefficient, VIF: Variance Inflation Factor, M/L: Medial/Lateral, F/B: Forward/Backward, S/I: Superior/Inferior, X: Sagittal angle/movement, Y: Coronal angle/movement, Z: Horizontal angle/movement
*: p<.05, **: p<.001

Table 4. Results of forward selection for javelin kinematic variables in E3 moment

Performance		Variables	*B*	SE	*β*	*t*	*p*	VIF	Pearson *r*
Record	Sagittal plane	Constant	81.267	14.902		5.453	0.000		
		ATTITUDE ANG1	-1.165	0.296	-0.289	-3.939	.001*	1.100	-0.642
		JAV_VEL_Y	0.958	0.279	0.225	3.433	.002*	1.100	0.597
		R=0.591, R^2=0.591, Adjusted R^2=0.561, F=19.514, p=.000							
	Transverse plane	Constant	50.051	5.097		9.820	0.000		
		ATTITUDE ANG2	-0.853	0.124	-0.110	-6.900	.000**	1.247	-0.840
		JAV_VEL_Y	0.601	0.224	0.141	2.681	.012*	1.247	0.597
		R=0.767, R^2=0.767, Adjusted R^2=0.750, F=44.433, p=.000							

B: Unstandardized coefficient, SE: Standard error of *B*, β: Standardized coefficient, VIF: Variance Inflation Factor, M/L: Medial/Lateral, F/B: Forward/Backward, S/I: Superior/Inferior, X: Sagittal angle/movement, Y: Coronal angle/movement, Z: Horizontal angle/movement
*: p<.05, **: p<.001

3. 창 릴리즈 순간(E3)의 운동학적 변인에 대한 다중회귀 결과

1) 인체 움직임에 대한 다중회귀 결과

창이 손에서 떨어지는 순간(E3)의 방향별 운동학적 요인 중, 기록에 유의미한 영향을 미치는 주요 변수들은 <Table 3>과 같다. 시상면에서는 Waist angle, Head angle, Center of Mass, Center of mass velocity가 Adjusted R^2=0.981, p<.001 수준으로 기록에 유의미한 영향을 미쳤다. 특히, 신체 중심의 좌우 위치 변화는 β -18.606 (p<.05) 값을 보이며, 표준편차 1 이상의 변화가 증가할 때 기록에 부정적 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반대로, 신체 중심 좌-우의 최대 속도 변화는 기록에 양적인 영향을 미친다는 결과(β 66.323; p<.05)가 나타났다. 관상면에서는 Right ankle angle, Center of mass velocity, Neck angle, Right hip angular velocity가 Adjusted R^2=0.973, p<.001의 수준에서 기록과 관련성이 있었다. 특히, 신체 중심의 전방 속도는 창던지기 기록에 β 38.694 (p<.05) 수준만큼 양적 증가의 영향을 줄 수 있다는 결과가 도출되었다. 수평면에서는 Right ankle angle, Pelvis angular velocity, Waist angle 요인들이 Adjusted R^2=0.979, p<.001 수준에서 기록에 영향을 주는 것으로 나타났다.

2) 창의 움직임에 대한 다중회귀 결과

창이 손에서 떨어지는 순간(E3)의 창의 운동학적 요인 중, 기록에 유의미한 영향을 미치는 것으로 채택된 주요 변수는 <Table 4>와 같다. 시상면과 수평면 모두(Adjusted R^2=0.561, p<.001; Adjusted R^2=0.750, p<.001)에서 창의 자세각과 창의 수평 속도가 동일하게 채택되었다. 특히, 자세각의 높은 변동은 기록에 부정적 영향을 미칠 수 있다는 결과가 나타났다. 반면, 창의 수평 속도는 그 변동에 따라서 기록에 양적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

DISCUSSION

육상 창던지기는 도움닫기를 이용한 운동 에너지의 생성과 지면 제동(braking)에 의한 에너지 전이를 효과적으로 수행해야 하는 매우 복잡한 경기이다(Bartlett & Best, 1988). 다른 육상 종목에서 나타나는 움직임의 종단이 곧 기록으로 측정되는 것과 달리, 신체 이외의 다른 물체에 행동의 결과를 투영시켜야 하기 때문에 동작 수행 후 즉각적인 기록 예측이 어렵다. 따라서, 선수 및 코치는 투사 직전까지의 움직임을 효율적으로 만들기 위해 노력해야 하며, 기록을 저하시킬 수 있는 불필요한 움직임을 보완 및 향상시킬 수 있어야 한다. 본 연구에서는 창이 투사되는 순간까지의 에너지 전환 과정 중, 각 단계에서 직접적으로 기록에 미치는 운동학적 요인들을 살펴보았으며, 다차원적 관점에서 보다 상세한 분석을 진행하였다. 그 동안의 선행 연구 대부분은 관절과 관절 사이의 절대 각도에 의한 자세 분석이 대부분이었으며(Park, Yang & Park, 2021; Lee, 2002; Cho, 2007), 이러한 이유는 실제 현장에서의 동작 분석의 한계 및 3차원 분절 각도 계산이 제한적이었기 때문이다. 창던지기는 지면에 전달한 힘을 역으로 이용하는 역동역학(Inverse dynamics)이 발생하고, 신체의 중심을 기준으로 전방위 분절 회전이 일어나는 에너지 전환 과정을 거치기 때문에(Morris et al., 1997), 크다, 작다의 절대 각도

크기 차이로 퍼포먼스를 설명하려는 것은 부적절할 수 있다. 본 연구에서는 비 마커식 3차원 분절 각도 계산 시스템을 사용하여 이 문제를 해결하였고, 전환 과정 속에서 다차원의 개별 변인들이 기록에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

먼저, 도움닫기 후 첫 제동이 일어나는 E1에서 기록에 미치는 핵심 요인들을 살펴보면, 시상면에서 허리 관절의 굴곡 각속도, 발 분절의 각도, 목의 굴곡 각도, 투사 반대 팔의 팔목 굴곡 각속도, 제동발의 각도가 기록에 유의미한 영향을 주었다. 특히, 표준화된 각 요인의 β 값을 살펴보았을 때, 후방 발(Right foot angle) 분절의 각도 변화(표준편차 증가)가 높을수록 기록이 저하되는 β -0.011의 음수 값이 나타났다. 이는 이 단계에서 후방 발의 시상면 변동성을 제한해야 한다는 해석으로 이해될 수 있다. 관상면 및 관상축에서의 주요 요인은 우측 무릎 각도, 허리 관절 각도, 신체 중심 전방 이동 속도, 목관절 각도, 제동발 발목관절의 각도가 주요 요인들로 추출되었다. 본 결과에 의하면, 허리 관절의 좌우 각도 변화, 목의 좌우 각도 변화가 기록에 유해한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이는 해당 부분에서 고정적인 자세를 취해야 한다는 것을 의미한다. 다른 요인들은 변화 양상에 따라 기록에 양적인 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 신체 중심의 전방 속도는 β 8.162를 나타내면서, 1 표준편차 증가함에 따라 기록에 크게 영향을 미치는 핵심 요인이라는 것을 확인할 수 있었다. 수평면에서의 주요 요인들은 골반 분절의 각도, 후방 다리의 고관절 각속도, 신체 중심의 수직 속도로 추출되었다. 그 중, 신체 중심의 상-하 속도 변화가 β -72.489라는 높은 값으로 나타나면서, 기록 저하에 큰 영향을 미칠 수 있다는 결과가 나타났다. 즉, 이 단계에서는 신체 중심의 수직 변화를 줄이고 최대한 전방을 향해 고정적으로 유지해야 한다는 제안이 가능하다. Lee (2004)는 창던지기의 크로스오버 스텝과 딜리버리 구간에서 올바른 자세 교정이 경기력을 향상시킬 수 있는 열쇠라고 보고하였으며, Hubbard & Always (1989)는 신체 중심의 속도 증가가 창의 수평비행거리에 긍정적인 영향을 미치는 핵심 요인이라고 보고하였다. 즉, 이 단계에서는 신체 중심의 전방 이동 이외의 변동성을 줄여서 안정적으로 이동하도록 수행하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

두 번째로, 최대 제동 힘이 발생하는 E2 순간의 유의미한 요인들을 살펴보면, 시상면과 시상축에서는 후방 발의 분절 각도, 투사 반대 팔의 팔꿈치 각도, 투사 팔의 어깨 각도, 신체 중심의 좌우 위치, 투사 반대 팔의 팔꿈치 각속도 요인들이 기록에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 E1과 마찬가지로 신체 중심의 좌우 위치 요인이 β -17.604로 높게 나타나면서, E1에 이어서 기록에 악영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 반면, 투사 팔 어깨 각도의 변화, 투사 반대 팔의 팔꿈치 각속도의 변화는 기록에 양적인 영향을 줄 수 있다는 결과도 나타났다. 관상면에서는 흉부 분절의 좌-우 각속도, 투사 팔의 어깨 관절 각도, 제동발의 발목 관절 각속도, 후방 발의 분절 각속도, 투사 팔의 팔꿈치 각도가 기록에 영향을 주는 것으로 나타났다. 본 요인들의 개별 영향은 비교적 크지 않았으나, 상대적으로 투사 팔의 발꿈치 각도의 변화가 클수록 기록이 저하될 수 있다는 결과가 도출되었다. 수평면에서의 주요 요인은 골반 분절의 각도, 제동발의 고관절 각도가 기록에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히, 골반 분절의 각도 변동이 기록의 유의미한 양적 증가를 가져올 수 있으며, 제동발의 고관절 각도는 되도록 고정적인 자세를 취해야 하는 것으로 나타났다.

세 번째로, 창을 던지는 순간인 E3에서 기록에 유의미한 영향을 주는 인체의 운동학적 변수 및 창의 운동학적 변수를 나누어 살펴보면, 먼저, 인체의 시상면에 대한 운동학적 요인은 허리 관절 각도, 머리 분절 각도, 신체 중심의 좌-우 위치, 신체 중심의 좌-우 속도가 기록에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히, 허리 관절의 굴곡 변화, 머리 분절의 굴곡 변화, 신체 중심 좌-우 위치 포지셔닝의 변동성은 기록에 악영향을 미치는 저해 요인으로 판단할 수 있다. 반면, 신체 중심의 좌-우 속도 변화는 기록에 양적인 증가 영향(β 66.323, p<.05)을 줄 수 있기 때문에, 던지는 순간에는 신체 중심은 좌-우의 빠른 속도를 생성하고 있어야 한다. 즉, 공간상에 일관되게 신체 중심의 위치를 포지션 하는 것이 중요하며, 그 위치를 만들기 위한 움직임의 빠르기는 최대로 했을 때 기록에 긍정적인 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다. 인체의 관상면에서의 움직임 요인은 후방 발의 발목 각도, 신체 중심의 전방 속도, 목 관절의 각도, 후방 발의 고관절 각속도가 기록에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이때, 후방 발의 변화는 기록에 부정적 영향을 미치며 다른 세 가지 요인의 변화는 기록의 양적 증가에 영향을 줄 수 있다. 특히, 신체 중심의 전방 이동 속도는 β 38.694 (p<.001)의 매우 명확한 결과가 나타나면서 핵심적인 요인으로 판별할 수 있다. 수평면에서의 요인은 후방 발의 발목 관절 각도, 골반 분절의 각속도, 허리 관절 각도가 채택되었다. 특히, 후방 발의 발목 각도 및 골반 분절의 각속도는 변화량이 커질수록 기록에 양적 증가를 도모할 수 있을 것으로 나타났으며, 허리 관절의 각도 변화는 기록의 저해 요인으로서 크게 발생시키지 않아야 하는 것으로 도출되었다.

마지막으로, 창을 던지는 E3 순간에 창이 갖는 다양한 운동학적 변인 중, 기록에 영향을 주는 요인들을 살펴보면, 시상면과 수평면 각각 모두에서 창의 자세각 및 창의 수평 속도만이 채택되었다. 특히, 자세각은 변화가 클수록 기록의 저해 요인으로 작용할 수 있으며, 창의 수평 속도 변화량은 커질수록 기록에 양적 영향을 미치는 것으로 도출되었다. 이와 같은 결과는, 그 동안 여러 연구들에서 분석된 투사각(Hur, 2011; Park, 2008)과 공격각(Kim, Ryu & Park, 2013; Maier, Wank, Bartonietz & Blickhan, 2000)에 대한 중요도와 달리, 창

의 자세각과 창의 전방 투사 속도가 보다 핵심적인 변인으로 고려되어야 함을 의미한다고 할 수 있다.

CONCLUSION

본 연구의 목적은 육상 창던지기 시 기록에 영향을 주는 운동학적 변수들의 중요도를 살펴보고, 선수 및 현장의 코치들에게 효율적인 자세의 과학적 단서를 제공하는 것에 있다. 이를 위해 에너지 전이 과정의 딜리버리 단계부터 릴리즈 순간까지에 대해 3차원적 다중회귀 분석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 제동이 시작될 때 신체 중심의 수직 움직임을 제한하고 전방으로 무게 중심이 빠르게 이동될 수 있도록 해야 한다. 둘째, 완전한 제동이 걸리면서 신체 중심과 몸통이 좌-우로 흔들리지 않도록 고정해야 하며, 제동발의 발목, 고관절도 고정되도록 한다. 또한 골반 분절의 회전을 유도하고, 당기는 팔꿈치의 각속도를 높이고, 후방 발의 내번 각속도를 빠르게 해야 한다. 셋째, 제동 후 던지는 순간까지의 찰나 동안 골반 분절의 회전 각속도를 높여, 전방-외측으로 신체 중심 속도를 순간적으로 빠르게 이동시켜야 한다. 모든 일련의 수행 후 창의 전방 속도가 증가할 때 기록이 유의하게 향상될 수 있다.

REFERENCES

Antti, M., Komi, P. V., Korjus, T., Navarro, E. & Gregor, R. J. (1994). Body segment contributions to javelin throwing during final thrust phases. *Journal of Applied Biomechanics*, *10*(2), 166-177.

Bartlett, R. M. & Best, R. J. (1988). The biomechanics of javelin throwing: *A Review. Journal of Sports Sciences*, *6*(1), 1-38.

Best, R. J., Bartlett, R. M. & Morriss, C. J. (1993). A three-dimensional analysis of javelin throwing technique. *Journal of Sports Science*, *11*, 315-328.

Cho, P. H. (2007). The kinematical analysis of releasing moment in Javelin throwing. *Journal of Korea Sport Research*, *18*(4), 489-496.

Hubbard, M. & Alaways, L. W. (1989). Rapid and accurate estimation of release conditions in the javelin throw. *Journal of Biomechanics*, *22*(6-7), 583-595.

Hur, S. M. (2011). *A kinematics analysis of release phase javelin throwing*. Unpublished Master's Thesis, Graduate School of Kong Ju National University.

Kim, T. S., Ryu, J. S. & Park, J. M. (2013). The kinematic characteristics of javelin in Korean male javelin throwers following rank. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *23*(2), 99-108.

Kim, W. J. (2014). The relationship between the distance and kinematical parameters of javelin in Korean male javelin throwers. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *24*(3), 217-227.

Komi, P. V. & Mero, A. (1985). Biomechanical analysis of Olympic javelin throwers. *Journal of Applied Biomechanics*, *1*(2), 139-150.

Lee, J. H. (2002). Kinematical analysis of woman javelin throwing. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *12*(2), 345-359.

Lee, Y. S. (2004). The kinematic analysis of crossover step and delivery phase in female javelin throwing players. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *14*(3), 149-163.

Maier, K. D., Wank, V., Bartonietz, K. & Blickhan, R. (2000). Neural network-based models of javelin flight: Prediction of flight distances and optimal release parameters. *Sports Engineering*, *3*, 57-63.

McKinney, W. (2011). pandas: a foundational Python library for data analysis and statistics. *Python for High Performance and Scientific Computing*, *14*(9), 1-9.

Morriss, C., Bartlett, R. & Fowler, N. (1997). Biomechanical analysis of the men's javelin throw at the 1995 World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, *12*, 31-42.

Park, J. M. (2008). *The kinematic analysis of man's javelin throwing at support foot landing-the relationship between knee angle and throwing distance*. Unpublished Master's Thesis, Graduate School of Korea National Sport University.

Park, J. M., Yang, J. J. & Park, J. C. (2021). The relationship between Javelin records and kinematic factors. *The Korea Journal of Sports Science*, *30*(6), 819-827.

Park, J. M. & Yoon, S. H. (2010). Kinematical analysis of projection factors to record difference during women's javelin throwing. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *20*(4), 457-467.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O. & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *The Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825-2830.

Seabold, S. & Perktold, J. (2010). Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. *In Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, *57*(61), 92-96.

Van Der Walt, S., Colbert, S. C. & Varoquaux, G. (2011). The NumPy array: a structure for efficient numerical com-

putation. *Computing in Science & Engineering*, *13*(2), 22-30.

Young, M. (2007). Preparing for the specific neuromuscular and biomechanical demand of the javelin throw. *Human Performance Consulting*, 1-12.

Zelle, J. M. (2004). *Python programming: an introduction to computer science*. Franklin, Beedle & Associates Inc..