



Original Article

Kinematic Analysis of Hurdle Step Success and Failure in Springboard Diving

Jiho Park¹ and Sukhoon Yoon^{2*}

¹Department of Sports Science, Korea Institute of Sports Science

²Department of Community Sport, Korea National Sport University

Article Info

Received 2025. 09. 03.

Revised 2026. 01. 10.

Accepted 2026. 05. 29.

Correspondence*

Sukhoon Yoon

sxy134@knsu.ac.kr

Key Words

Diving, Springboard,
Hurdle step,
Mechanical energy

PURPOSE This study aimed to examine the kinematic differences between successful and failed (bault) hurdle steps in springboard diving and to identify key factors influencing successful execution. **METHODS** Ten diving athletes (age: 20.82 ± 2.75 years; height: 170.09 ± 5.86 cm; body mass: 64.91 ± 5.63 kg; career: 11.64 ± 2.46 years) performed both successful and failed hurdle step movements during a national diving competition. Whole-body center of mass (WCoM) variables—including position, velocity, tilt angle, projection angle, mechanical energy, work, and average impact force—were analyzed. Paired t-tests were used to compare movement types, and binary logistic regression (forward likelihood ratio) was conducted to identify predictors of success. **RESULTS** At board contact (E1), baults exhibited significantly lower mechanical energy ($p < .05$). During board recoil (P2), posterior impact force was significantly higher in baults ($p < .05$). At take-off (E3), successful hurdle steps demonstrated higher forward WCoM velocity, a more upright tilt angle, a more favorable projection angle, and greater mechanical energy ($p < .05$). Mechanical work during the push-off phase (P3) was also significantly greater in successful steps ($p < .05$). Logistic regression analysis indicated that only mechanical energy at E3 significantly predicted success ($p < .05$). **CONCLUSIONS** Mechanical energy at take-off (E3) is a key predictor of successful hurdle step execution. Quantitative analysis of WCoM variables may support technical planning and performance evaluation, informing strategies to reduce baults and improve consistency in springboard diving.

서론

다이빙(Diving)은 수면 위에서 도약을 통해 공중 동작을 수행한 후 입수하는 고난이도 스포츠 종목으로, 신체 조정 능력, 공간 감각, 근력, 유연성, 그리고 균형 감각 등 복합적인 체력 요소를 요구한다(McCormick et al., 1982; Ministry of Culture, Sports and Tourism & Korea Institute of Sport Science[MCST & KISS], 2021). 다이빙 경기는 플랫폼 다이빙과 스프링보드 다이빙으로 구분되며, 이 중 스프링보드 다이빙은 탄성을 가진 보드의 반발력을 이용하여 높은 도약으로 공중회전 기술을 수행하는 종목이다(Fédération Internationale de Natation [FINA], 2022; O'Brien, 2003; Sanders

& Gibson, 2000; Sanders & Wilson, 1988; Walker et al., 2014).

스프링보드 다이빙에서 도약은 공중 동작의 질과 기술의 완성도를 결정짓는 핵심 단계이다(Kang & Nam, 2010; Kim et al., 2019; Kong, 2005; Oh & Lee, 1995; Park & Yoon, 2017). 이때 하중에 의해 하방으로 휘어진 보드에 저장된 탄성에너지를 효율적으로 활용하는 것이 중요하다(Miller et al., 1998; Sanders & Gibson, 2000; Sinclair et al., 2012). 하지만 저장된 탄성에너지는 단순히 보드의 구조적 반발력만으로 전달되지는 않는다. 선수의 신체 움직임, 보드 접촉 시점, 관절의 정렬, 속도 및 타이밍 등 다양한 요소가 정밀하게 조화될 때 비로소 효과적으로 활용될 수 있다(Lee, 2006; Lee, 2008; O'Brien, 2003; Sinclair et al., 2012). 따라서 기술 수행에 필요한 체공시간과 각운동량을 확보하기 위해서는, 스프링보드에 저장된 탄성에너지를 도약 동작으로 원활하게 전이시킬 수 있는 동작적 수단이 필수적이며, 이때 결정적인 역할을 수행하는 것이 바로 허들스텝

© 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.

(hurdle step)이다(Barris et al., 2014; Huber, 2015; Slobounov et al., 1997).

허들스텝은 보드의 탄성 에너지를 최대한 활용하기 위한 준비 동작으로 선수가 보드 끝으로 접근한 후 양팔과 한쪽 다리를 상방으로 스윙하고, 반대쪽 다리로 스프링보드에 힘을 전달하여 반동과 사전 도약을 수행한다. 이 동작은 이후 연결되는 도약과 공중동작의 성공 여부를 결정짓는 핵심 동작이다(FINA, 2022; Miller et al., 1998; Huber, 2015). 이러한 동작은 흔들리는 스프링보드에 한쪽 다리로 사전도약을 준비하기 때문에 뛰어난 리듬감과 균형 유지, 상·하지 협응을 통해 보드에 효과적인 충격량을 전달해야 하는 등 다양한 요소가 복합적으로 작용하는 고난이도 기술로 평가되며, 실제 경기상황에서는 많은 선수들이 공중회전 기술보다 허들스텝 수행에 더 많은 신경을 쓰는 것으로 보고되고 있다(Huber, 2015; O'Brien, 2003; Slobounov et al., 1997).

허들스텝 수행의 어려움으로 인해 실제 경기에서는 허들스텝 중 균형이 흐트러지거나 타이밍이 맞지 않아 동작 수행을 중단하는 경우가 발생하는데 이를 보크(baulk)라 하여 감점을 받게 된다(FINA, 2022). 특히 보크는 훈련 상황에서 매우 빈번하게 발생하며, 시합 중에도 간헐적으로 나타나 기술 실패와 득점에 직접적인 영향을 미친다(Barris, Farrow, et al., 2013; Huber, 2015). 이로 인해 선수 및 지도자들은 허들스텝의 일관성 확보와 보크 예방을 위한 연구의 필요성을 지속적으로 제기해 왔다(Miller et al., 2002; Sinclair et al., 2012). 그럼에도 불구하고 선행연구들은 도약 순간의 분석에 집중되어 있으며, 다이빙 훈련지도서에는 보크의 발생 원인이 허들스텝의 걸음걸이에 변화, 하지와 상지 관절들의 빠른 움직임으로 인해 나타난다고 설명하고 있다(MCST & KISS, 2021; Huber, 2015).

성공적인 허들스텝과 보크 간의 운동학적 차이를 비교한 Barris, Farrow, et al.(2013)은 호주 다이빙 대표선수 다섯 명을 대상으로 연구를 진행하였다. 그들의 연구에서는 성공적인 허들스텝과 보크간의 하지관절의 움직임 패턴에서 명확한 차이가 나타나지 않았기 때문에 허들스텝이 불안정하다고 판단되더라도 멈추지 말고 도약으로 연결하도록 제안하였다. 또한, Huber(2015)는 보크의 원인을 단순히 보드 접근 시의 보폭 변화나 상·하지 관절의 급격한 속도 변화와 같은 국소적인 움직임의 문제로 설명하였다.

하지만 이러한 선행연구는 하지 관절의 변위나 각도 등 국소적인 움직임 분석에 국한되어 있어, 보크의 근본적인 원인인 신체 전체의 균형 무너짐과 타이밍 부조화를 규명하기에는 한계가 있다. 실제 허들스텝 수행 시 선수들은 신체 전체의 동적 안정성을 유지하는 데 집중하므로(O'Brien, 2003; Slobounov et al., 1997), 국소 관절의 움직임을 넘어 신체 전체의 질량 중심인 전신무게중심(Whole Body Center of Mass, WCoM)의 움직임을 분석할 필요가 있다.

기존 선행연구들이 허들스텝 수행을 하지관절의 국소적인 운동학적 특성을 중심으로 분석한 데 반해, 본 연구는 WCoM을 기반으로 스프링보드에 저장된 탄성에너지가 도약 동작으로 전이되는 신체 전체의 에너지 전달 효율성을 분석하였다. 이를 통해 허들스텝 수행의 성패를 설명하는 운동학적 지표를 제시하고자 한다.

따라서 본 연구의 목적은 스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 따른 운동학적 차이를 WCoM 기반으로 규명하고, 허들스텝 성공에 기여하는 주요 요인을 도출하는 데 있다.

연구방법

연구 대상

연구는 K대학교 생명윤리위원회의 연구윤리 승인을 마친 후 진행되었으며(20230621-059), 연구대상자들은 전국체육대회 남자 3 m 스프링보드 다이빙 개인전과 남자 싱크로다이빙 결승전에 출전한 선수들 가운데 스프링보드 탄성 9번을 사용하며, 전국 대회에서 입상 경력을 가지고 있는 선수들로 선정하였다. 그중 연구의 목표인 허들스텝의 성패에 따른 운동학적 차이를 분석하기 위해 각 선수마다 성공 조건에 맞는 허들스텝과 보크를 모두 1회 이상 수행한 선수들을 선별하였으며, 최종적으로 10명의 선수들을 연구 대상으로 선정하였다. 경기가 완료된 후 참가한 선수들의 영상촬영 데이터의 사용 동의를 구한 후 각 선수들의 신체적 특성을 조사하였다. 연구 대상자들의 신체적인 특성은 <Table 1>과 같다.

분석 장비

스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 따른 운동학적 분석을 위해 비디오카메라(HXR-M2000, Sony, Japan) 6대를 삼각대에 고정하여 다이빙 풀 주변으로 설치하였으며, 영상 해상도는 1080p, 셔터스피드는 1000 f/s, 카메라 샘플링율은 60 Hz 로 설정하였다. 또한 3 차원 공간좌표를 산출하기 위해 길이 1m, 폭 1m, 높이 6m 크기의 통제점틀(control object)을 스프링보드 허들스텝이 수행되는 공간에 설치한 후 카메라 캘리브레이션(calibration)을 실시하였다.

연구 절차

1. 자료 수집

본 실험은 전국체육대회 다이빙 경기가 진행되는 수영장에서 실시하였으며, 대회 전 대한수영연맹과 선수단 코치, 감독에게 연구의 내용과 절차 등을 설명하여 연구목적의 영상촬영 동의를 구한 후 수행되었다. 대회 시작 전 영상촬영을 위하여 6대의 비디오카메라를 삼각대에 고정하여 수영장 외곽과 관중석에 배치하였으며, 스프링보드 끝 지점에 수동으로 조도와 초점을 설정한 후 카메라 캘리브레이션을 실시하였다. 대회 중 촬영된 영상 중 허들스텝을 사용한 3.0 이상의 난이도 기술 중 심판점수 7.5점 이상을 받은 기술의 허들스텝 동작을 성공동작으로 분류하여 분석에 사용하였으며, 허들스텝 점프 후 제자리에서 멈춘 동작을 보크동작으로 분류하여 분석에 사용하였다. 각 카메라간 시간적 동조(synchronization)는 선수의 발이 보드에 접촉하는 시점으로 설정하였다.

Table 1. Characteristics of the subjects

(Mean ± SD)

Variables	male (n=10)
Age (yrs.)	20.82±2.75
Height (cm)	170.09±5.86
body mass (kg)	64.91±5.63
Career (yrs.)	11.64±2.46

2. 자료 처리

스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 따른 운동학적 분석을 위한 각 대상자별 영상자료는 Vegas pro 12.0 (Sony, Japan) 프로그램을 사용하여 허들스텝 동작을 편집하였다. 신체 움직임을 정량화하기 위해 11개의 분절들이 서로 연결되어있는 강체 시스템(linked rigid body system)으로 모델링 하였으며, 각 분절을 연결하는 14개 관절의 위치(좌·우 손목, 팔꿈치, 어깨, 발끝, 발목, 무릎, 엉덩관절)를 수동으로 디지털타이징(digitizing)하였으며, 각 관절의 위치와 운동학적 분석 변인은 Kwon3D XP (Visol, Korea) 프로그램을 사용하였다. 모든 영상은 연구자 1인이 동일한 기준으로 수동 디지털타이징하였으며, 디지털타이징 좌표의 시간적 일관성을 확인하기 위해 모든 대상자의 각 이벤트 간 대퇴 분절 길이의 변동계수(coefficient of variation, CV)를 산출하였다(Dos Santos et al., 2017). 이때 산출된 대퇴 분절 길이와 CV는 각각 $36.8 \pm 1.2\text{cm}$, $3.3 \pm 1.6\%$ 로 나타났다.

위치 데이터를 취득하는 과정에서 발생하는 랜덤 노이즈를 감소시키기 위해 버터워스 2차 저역통과디지털필터(Butterworth 2nd order low-pass filter)를 사용하였다. 추가로 디지털필터에서 발생하는 phase lag을 제거하고 필터의 성능을 향상시키기 위하여 반대방향으로 한 번 더 필터를 진행하였으며, 이때 차단주파수(cut-off frequency)는 선행연구를 참고하여 6 Hz로 설정하였다(Barris, Davids, et al., 2013).

분석 시점

스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 따른 운동학적 분석하기 위해 허들스텝 걸음이 스프링보드에 닿는 순간(hurdle step contact, E1), 보드가 가장 깊게 내려간 순간(maximum board depression, E2), 발이 떨어지는 순간(hurdle step take-off, E3)으로 구분하였으며, E1에서 E2 사이를 압축구간(depression phase, P1), E2와 E3를 반동구간(recoil phase, P2), 그리고 E1에서 E3의 전체 구간(total hurdle step phase, P3)으로 나누어 분석하였다(Fig. 1).

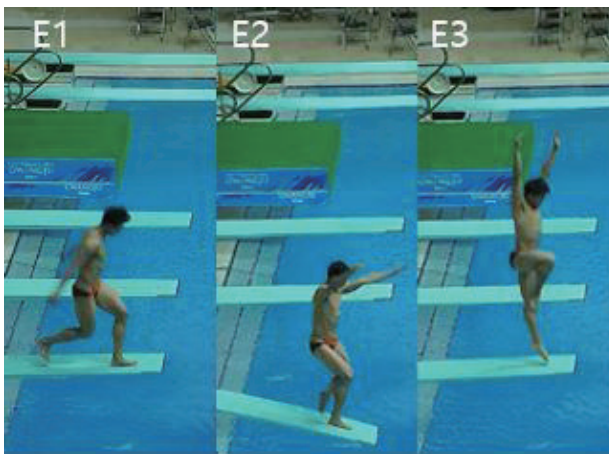


Fig. 1. Analysis event while performing hurdle step

분석 변인

스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 따른 운동학적 분석을 위해 WCoM 위치(WCoM position), WCoM 속도(WCoM velocity), WCoM 기울기 각도(WCoM tilt angle), WCoM 도약각도(WCoM takeoff angle)를 산출하였으며, 역학적 에너지(mechanical energy), 역학적 일(mechanical work), 평균 충격력(impact force)을 산출하였다.

1. WCoM 위치

WCoM 위치는 Tylkowski et al.(1982)의 인체분절지수(Body Segment Parameters)를 참고하였으며, 11개 신체 분절의 상대 질량 비율과 해당 질량이 위치를 통해 스프링보드 받침점을 기준으로 3차원 WCoM 위치를 산출하였다.

2. WCoM 속도

WCoM 속도는 시간에 따른 산출된 WCoM의 위치 변화율을 기반으로 산출하였으며, 중앙차분법(central difference method)을 통해 3차원 WCoM 속도를 산출하였다.

3. WCoM 기울기 각도

WCoM 기울기 각도는 스프링보드를 지지한 발끝에서 WCoM 방향의 벡터가 수직선과 이루는 각도를 의미하며, 0° 에 가까울수록 디딤발과 신체의 정렬되었음을 의미한다. 시상면 기울기 방향은 수직선을 기준으로 후방 기울기는 양(+), 전방 기울기는 음(-)의 방향이며, 관상면의 경우 오른쪽 기울임을 양(+)의 방향으로, 왼쪽 기울임을 음(-)의 방향으로 설정하였다.

4. WCoM 도약각도

WCoM 도약각도는 E3에서의 WCoM 수직속도와 전후방 속도의 합으로 산출된 합성벡터의 기울기를 의미한다. 이 각도는 신체가 도약 시 어느 방향으로 도약하였는지를 나타내며, 시상면과 관상면 모두에서 수평선을 기준으로 반시계방향을 양(+)으로, 시계방향을 음(-)으로 설정하였다.

5. 역학적 에너지

역학적 에너지는 허들스텝 수행 중, 신체가 보유한 위치에너지(potential energy)와 운동에너지(kinetic energy)의 합으로, 특정 시점에서의 에너지 상태를 정량적으로 나타내는 데 활용하였다. 본 연구에서 산출된 WCoM의 수직 위치 및 수직속도를 이용하여 각 시점별 역학적 에너지를 산출하였으며, 선수 간 비교를 위한 표준화를 위해 질량으로 나누어 계산하였다(Sinclair et al., 2012).

$$\frac{E}{m} = (9.81 \times WCoM_p) + \left(\frac{1}{2} WCoM_v^2\right)$$

Formula 1. Mechanical energy

6. 역학적 일

역학적 일은 전체 구간(P3) 동안의 역학적 에너지 변화량을 의미하며, 허들스텝 발 구름 중 에너지 생성 및 전달의 효율성을 평가하는 데 활용하였다. 본 연구에서 산출된 E3과 E1의 역학적 에너지의 차이

를 구하여 역학적 일을 산출하였다(Sinclair et al., 2012).

$$W = E_f - E_i$$

Formula 2. Mechanical work

7. 평균 충격력

스프링보드에 접촉한 후부터 발이 떨어지기 전까지의 두 구간(P1, P2) 동안 발생한 평균 충격력을 WCoM의 속도 변화량 기반으로 산출하였으며(Hay, 1992), 선수의 체중으로 나누어 표준화하였다.

$$\overline{F} = \frac{(WCoM_{vf} - WCoM_{vi})}{\Delta t}$$

Formula 3. Impact force

통계 변인

스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 따른 운동학적 변인 간 차이를 검증하기 위해 대응표본 *t*-검정(paired *t*-test)을 실시하였으며, 변인들이 허들스텝의 성패에 미치는 영향을 분석하기 위해 이항 로지스틱 회귀분석(binomial logistic regression analysis)을 실시하였다. 로지스틱 회귀분석에는 대응표본 *t*-검정에서 유의한 차이를 나타낸 변인을 독립변수로 설정하고, 전진선택법(forward likelihood ratio, LR)을 적용하였다. 로지스틱 회귀분석에 앞서 독립변수 간 다중공선성의 가능성을 검토하였다. 이때 모든 통계적 유의수준 $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

연구결과

WCoM 위치

스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 따른 WCoM 위치 결과는 <Table 2>와 같다. 본 연구결과 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다.

WCoM 속도

허들스텝의 성패에 따른 WCoM 속도 결과는 <Table 3>과 같다. 본 연구결과 전후측 E3에서 허들스텝 성패간의 유의한 차이를 나타내었다($p < .05$).

Table 2. WCoM position (Mean ± SD)

Variables	Event	Successful	Baulk	<i>t</i>	<i>p</i>
Mediolateral axis (m)	E1	0.01±0.07	0.00±0.06	.67	.52
	E2	0.02±0.06	0.01±0.07	.04	.97
	E3	0.02±0.05	0.02±0.07	-.14	.89
Anteroposterior axis (m)	E1	2.72±0.03	2.77±0.09	-2.18	.06
	E2	2.95±0.04	2.98±0.07	-1.46	.18
	E3	3.02±0.04	3.03±0.06	-.051	.62
Vertical axis (m)	E1	0.85±0.13	0.83±0.10	.53	.61
	E2	0.32±0.07	0.31±0.08	.44	.67
	E3	1.27±0.06	1.24±0.09	.87	.41

WCoM 기울기 각도

허들스텝의 성패에 따른 WCoM 기울기 각도 결과는 <Table 4>와 같다. 본 연구결과 시상면 E3에서 허들스텝 성패간의 유의한 차이를 나타내었다($p < .05$).

WCoM 도약각도

허들스텝의 성패에 따른 WCoM 도약각도 결과는 <Table 5>와 같다. 본 연구결과 시상면에서 허들스텝 성패간의 유의한 차이를 나타내었다($p < .05$).

역학적 에너지

허들스텝의 성패에 따른 역학적 에너지 결과는 <Table 6>과 같다. 본 연구결과 E1과 E3에서 허들스텝 성패간의 유의한 차이를 나타내었다($p < .05$).

Table 3. WCoM velocity (Mean ± SD)

Variables	Event	Successful	Baulk	<i>t</i>	<i>p</i>
Mediolateral axis (m/s)	E1	-0.03±0.08	-0.03±0.04	.05	.97
	E2	0.05±0.10	0.06±0.11	-.31	.76
	E3	-0.02±0.06	0.01±0.07	-1.31	.22
Anteroposterior axis (m/s)	E1	1.02±0.34	0.99±0.32	1.21	.26
	E2	0.55±0.07	0.50±0.13	1.49	.18
	E3	0.12±0.05	-0.01±0.08	4.90	.00*
Vertical axis (m/s)	E1	-3.23±0.19	-3.27±0.20	1.52	.16
	E2	0.66±0.27	0.57±0.28	1.01	.34
	E3	4.08±0.14	4.12±0.20	-.68	.51

*: significant difference

Table 4. WCoM tilt angle (Mean ± SD)

Variables	Event	Successful	Baulk	<i>t</i>	<i>p</i>
Sagittal plane (°)	E1	29.44±4.63	27.90±5.40	2.11	.07
	E2	10.57±1.90	9.89±1.55	1.09	.30
	E3	6.56±1.56	7.74±1.44	-2.49	.03*
Frontal plane (°)	E1	0.25±1.48	0.61±1.08	-.61	.56
	E2	-0.12±1.04	0.06±0.74	-.37	.72
	E3	0.24±0.87	0.97±1.64	-1.05	.32

*: significant difference

Table 5. WCoM takeoff angle (Mean ± SD)

Variables	Event	Successful	Baulk	<i>t</i>	<i>p</i>
Sagittal plane (°)	E3	88.34±0.67	90.12±1.12	-4.81	.00*
	E3	90.38±0.82	89.89±0.94	1.72	.12

*: significant difference

Table 6. Mechanical energy

(Mean±SD)

Variables	Event	Successful	Baulk	<i>t</i>	<i>p</i>
Mechanical energy (J/kg)	E1	21.55±1.79	16.63±1.59	7.84	.00*
	E2	11.38±0.67	10.99±0.77	1.05	.32
	E3	28.71±0.88	20.94±3.09	7.79	.00*

*: significant difference

Table 7. Mechanical work

(Mean±SD)

Variables	Phase	Successful	Baulk	<i>t</i>	<i>p</i>
Mechanical Work (J/kg)	P3	7.16±1.39	4.31±2.10	4.85	.00*

*: significant difference

Table 8. Impact force

(Mean±SD)

Variables	Phase	Successful	Baulk	<i>t</i>	<i>p</i>
Mediolateral axis (N/BW)	P1	0.03±0.06	0.04±0.05	-.70	.70
	P2	-0.03±0.04	-0.02±0.05	-1.21	.26
Anteroposterior axis (N/BW)	P1	-0.19±0.14	-0.20±0.12	.23	.82
	P2	-0.16±0.03	-0.19±0.04	3.18	.01*
Vertical Axis (N/BW)	P1	1.55±0.12	1.57±0.17	-.40	.70
	P2	1.26±0.11	1.32±0.20	-.95	.37

*: significant difference

Table 9. Logistic regression analysis for factors affecting hurdle step success

Variables	Event	B	S.E	Wald	<i>p</i>	Exp(B)
Mechanical energy	E3	.761	.352	4.67	.03*	2.14

 $\chi^2=19.45$ ($p<.05$), Nagelkerke $R^2=.83$,

*: significant difference

역학적 일

허들스텝의 성패에 따른 역학적 일의 결과는 <Table 7>과 같다. 본 연구결과 역학적 일에서 허들스텝 성패간의 유의한 차이를 나타내었다($p<.05$).

평균 충격력

허들스텝의 성패에 따른 구간 별 평균 충격력의 결과는 <Table 8>과 같다. 본 연구결과 전후축 P2 에서 허들스텝 성패간의 유의한 차이를 나타내었다($p<.05$).

허들스텝 성패의 영향요인 분석

본 연구는 스프링보드 다이빙 허들스텝 성패에 영향을 미치는 주요 요인을 확인하기 위해 t -검정에서 통계적으로 유의한 차이를 나타낸 WCoM 속도, WCoM 기울기, WCoM 도약각도, 역학적 에너지, 평균 충격력을 독립변수로 이항 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 그

결과, 도약 시점(E3)의 역학적 에너지만이 허들스텝 성공을 유의하게 예측하는 변수로 나타났다($p<.05$). E3 시점의 역학적 에너지는 Wald 값 4.67($p=.03$)로 통계적 유의성을 보였으며, Exp(B)는 2.14로 확인되었다. 이는 도약 시점의 역학적 에너지가 1 J/kg 증가할 때 허들스텝 성공 확률이 약 2.14배 증가함을 의미한다. 전진선택법 적용 결과 최종 회귀모형에는 단일 독립변수만 포함되었으며, 이에 따라 다중공선성의 문제는 발생하지 않았다. 또한 본 회귀모형의 설명력은 Nagelkerke $R^2 = .83$ 으로 높은 수준을 보였고, 모형 적합도 역시 $\chi^2 = 19.45$ ($p<.05$)로 통계적으로 유의하였다(Table 9).

논 의

스프링보드 다이빙에서 허들스텝은 필수적으로 수행되어야 하는 기술임에도 불구하고, 많은 선수들이 안정적인 수행에 어려움을 겪고 있으며, 이로 인해 보크(baulk) 발생과 감점이 빈번히 나타난다(Huber, 2015). 그럼에도 불구하고 허들스텝 성패에 영향을 미치는 운동학적 요인에 대한 정량적 근거는 아직 부족한 실정이다(Barris, Farrow, et al., 2013). 이에 본 연구는 전신무게중심(WCoM)을 기반으로 한 변인들을 분석하여 허들스텝 성패의 원인을 규명하고자 하였다.

허들스텝 결음이 보드에 닿는 E1에서는 WCoM의 위치와 기울기에서 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았으나($p>.05$), 보크의 경우 후방에 있고 수직 위치가 더 낮았으며, 기울기도 더 크게 나타나는 경향이 있었다. 이러한 정렬의 차이는 발끝과 WCoM의 이상적인 위치 정렬이 이루어지지 않아, 스프링보드에 체중을 효과적으로 전달하는 데 불리하게 작용했을 것으로 판단된다. 실제로 E1에서의 역학적 에너지는 성공 동작보다 보크에서 약 22.8% 더 낮았으며($p<.05$), WCoM의 위치와 속도는 각각 개별적으로는 유의한 차이를 보이지 않았지만, 이들이 결합된 형태인 역학적 에너지는 성패 간 유의한 차이를 설명해주는 주요한 변수로 나타났다. 이는 도약 직전 신체가 가진 에너지 수준이 이후 도약 효율성과 밀접하게 연관됨을 보여준다(Sinclair et al., 2012).

다음으로 보드의 반동구간인 P2에서는 보드의 탄성을 활용하여 수직 속도를 확보하는 단계로, 하지 신전을 통한 효과적인 힘 전달이 중요한 시점이다. 본 연구에서는 직접적인 반작용력을 측정하지는 못했으나, WCoM의 속도 변화량을 통해 구간 평균 충격력을 추정하였다(Lee, 2011; Yang & Eun, 2010). 그 결과, 수직 충격력에는 성패 간 차이가 없었지만, 전후방 충격력은 보크에서 유의하게 더 큰 후방 충격력을 나타냈다($p<.05$). 이는 보드의 탄성 복원력이 전방 가속으로 효과적으로 전환되지 못하고, 신체 진행 방향에 대한 제동 충격(braking impulse)으로 작용했음을 의미한다(King et al., 2023; Lees et al., 2004).

이와 같은 전후방 방향의 제동 충격 증가는 허들스텝의 도약이 완성되는 시점인 E3의 운동학적 조건에 직접적인 영향을 미치게 된다. E3는 스프링보드가 상승하며 발이 보드에서 이탈하는 순간으로, 이 시점 이후에는 추가적인 운동량 획득이 불가능하므로 초기 속도 조건이 기술 성공에 결정적인 역할을 한다(Miller et al., 1998; Park & Yoon, 2017). 본 연구 결과, 성공 동작에서는 E3에서 WCoM 속도가 전방을 향한 반면, 보크 동작에서는 후방 속도가 나타났으며($p<.05$), 시상면 WCoM 기울기 또한 보크에서 평균 1.2° 더 크게 기울어져 있었다($p<.05$). WCoM 도약각도 역시 보크 동작에서 유의하게 증가하

여($p < .05$), 도약 방향의 불안정성이 확인되었다.

도약 시 WCoM의 시상면 정렬은 발-보드 접촉 과정에서 형성되는 반력 벡터의 방향과 에너지 전달 효율에 중요한 영향을 미친다. 선행 연구에서는 도약각도와 신체-보드 정렬 상태가 도약 높이 및 기술 수행의 성공과 밀접하게 연관된다고 보고하였다(Sanders & Wilson, 1988; Sinclair et al., 2012). 본 연구에서 관찰된 P2 구간의 후방 제동 충격과 E3 시점의 WCoM 정렬 변화는 보드에 저장된 탄성 에너지가 전방 및 상방 추진 에너지로 효율적으로 전환되지 못한 결과로 해석될 수 있다. 즉, P2 구간에서의 에너지 전달 부조화는 E3 시점에서의 WCoM 속도 방향과 도약각의 불안정성으로 이어졌으며, 이는 허들스텝 실패로 연결되는 주요 역학적 기전으로 작용한 것으로 판단된다.

또한 보드에 닿은 후 발구름이 일어나는 P3의 역학적 일은 선수가 P1 동안 보드에 저장된 탄성 에너지를 P2에서 하지의 신전을 통해 보드를 밀어내어 상호작용하는 구간으로, 성공적인 허들스텝에서 더 큰 역학적 일을 수행한 것으로 나타났다($p < .05$). 이는 선수가 보드에 더 많은 힘을 가하고, 이를 통해 탄성 에너지를 효과적으로 외부 운동 에너지로 전환함으로써, 전체 시스템 내 에너지를 효율적으로 증가시켰음을 시사한다. 즉, 발구름 구간에서의 에너지 증가는 선수의 적극적인 물리적 작업의 결과로 해석되며, 이는 허들스텝 기술 연결의 성공에 중요한 요인이 된다(Sinclair et al., 2012). 결과적으로 허들스텝의 성공을 위해서는 단일 시점(E3)의 에너지 크기뿐만 아니라, 전체 구간에서의 에너지 변화 패턴 역시 중요한 역할을 한다고 판단된다.

마지막으로, E3에서 성공 동작의 역학적 에너지는 보크에 비해 평균 2.85 J/kg 차이로 약 66% 높았으며($p < .05$), 이항 로지스틱 회귀 분석 결과에 따르면 E3 시점의 역학적 에너지만이 허들스텝 성공을 유의하게 예측하는 변수로 나타났다(Wald=4.67, Exp(B)=2.14, $p < .05$). 이는 선수의 발이 보드를 떠나는 순간 보유한 에너지 크기가 기술 성공 여부를 결정짓는 핵심 요소임을 의미한다. 특히 높은 역학적 에너지는 보드에 저장된 탄성 에너지가 효과적으로 방출되어 도약 에너지로 전환되었음을 시사하며, 이는 이후 기술 연결에 있어 필수적인 추진력을 확보하는 데 결정적인 역할을 한다.

실제 현장의 스프링보드 다이빙 선수들은 자신의 허들스텝 성공 여부를 E3부터 순간적으로 체감하며, 허들스텝 실패 원인을 균형에 잃은 자세라고 인식하고 있다. 그러나 기존 연구에서는 허들스텝 성패 간의 유의한 차이나 실패 원인을 명확히 제시하지 못하였다(Barris, Farrow, et al., 2013). 본 연구 결과, 보크 동작에서는 P2 구간의 후방 방향 평균 충격력이 증가하였고, 이는 E3 시점에서 나타난 WCoM의 후방속도와 더 큰 시상면 기울기 및 도약각 변화로 이어졌다. 또한 성공 동작에 비해 E3 시점의 역학적 에너지가 유의하게 낮게 나타났으며, 로지스틱 회귀분석 결과 E3의 역학적 에너지가 허들스텝 성공을 예측하는 주요 변수로 확인되었다. 이러한 결과는 보크 발생 원인이 단순한 균형 상실이나 자세 불안정성만이 아니라, 보드 반동 과정에서 발생한 후방 제동 충격으로 인해 WCoM의 진행 방향과 정렬이 변화하고, 이로 인해 저장된 탄성 에너지가 추진 에너지로 효율적으로 전환되지 못하는 에너지 전달 실패의 결과로 설명될 수 있음을 제안한다.

본 연구 결과를 통해 허들스텝의 성패를 단지 자세나 균형의 문제로 보던 기존 인식을 넘어, 구간별 에너지 생성과 전달의 효율성이 성공적인 기술 수행의 관건임을 명확히 보여주는 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 향후 훈련 및 코칭 전략에서는 도약 직전 순간의 에너지 확보와 전달 메커니즘에 대한 체계적인 접근이 필요할 것으로 판단된다.

결론 및 제언

본 연구는 스프링보드 다이빙에서 허들스텝의 성패에 따른 운동학적 차이를 WCoM을 중심으로 분석하였다. 그 결과, 성공 동작은 WCoM의 전방 속도, 안정된 WCoM 기울기와 도약각도를 보였으나, 보크는 후방 속도 및 큰 WCoM 기울기로 인해 도약 방향 각도가 크게 증가하였다. 또한 보크 시 P2에서 후방 충격력이 증가하여 추진력 손실 및 에너지 전이 방해가 나타났다. 전체 허들스텝 구간의 역학적 일 역시 성공 동작에서 더 크게 나타나, 에너지의 효과적인 생성과 전달이 성공적인 기술 수행에 기여함을 확인하였다. 특히 E3에서의 역학적 에너지가 성공 동작에서 실패 동작보다 약 66% 높았으며, 해당 변인은 허들스텝 성공을 유의하게 예측하는 변수로 확인되었다. 이는 도약 직전 시점에서 신체가 보유한 에너지의 크기가 기술 수행의 핵심 요인임을 시사한다.

이러한 결과는 허들스텝 성패의 원인을 단순한 동작이 아닌 에너지 효율성 관점에서 접근할 필요성을 확인하였다. 또한 도약 직전 순간의 에너지 확보, 탄성 에너지의 효과적 방출, WCoM의 위치·속도·기울기·도약각도와 같은 전신 운동학적 변인에 대한 정량적 분석은 허들스텝 수행을 보다 체계적으로 평가하는 데 유용한 정보를 제공한다. 본 연구에서 제시한 WCoM 기반 분석 결과는 허들스텝 수행의 정량적 평가 기준 설정과 훈련 과정에서의 수행 변화를 추적·분석하는 모니터링 체계 구축에 활용될 수 있을 것이다.

마지막으로 본 연구는 수동 디지털타이핑을 통해 자료를 획득하였기 때문에 데이터 처리에 많은 시간이 소요되어 분석에 필요한 표본수와 데이터를 수집하는 데 한계가 있었다. 또한 상대적으로 적은 수의 자료를 기반으로 연구가 수행되어 결과 해석에 주의가 필요하다. 따라서 향후 마커리스(markerless)기반의 영상 분석 기술을 도입하여 데이터 취득 시간을 단축하고 데이터 수집량과 대상자 수를 확대한다면, 다양한 조건과 시나리오에서의 허들스텝 분석이 가능해져 연구의 정밀성과 적용성이 더욱 높아질 것으로 기대된다.

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: Sukhoon Yoon, Jiho Park, Data curation: Jiho Park, Formal analysis: Jiho Park, Methodology: Sukhoon Yoon, Jiho Park, Project administration: Sukhoon Yoon, Jiho Park, Visualization: Sukhoon Yoon, Jiho Park, Writing-original draft: Sukhoon Yoon, Jiho Park, Writing-review & editing: Sukhoon Yoon, Jiho Park

참고문헌

- Barris, S., Davids, K., & Farrow, D. (2013). Representative learning design in springboard diving: Is dry-land training representative of a pool dive?. *European Journal of Sport Science*, 13(6), 638–645.
- Barris, S., Farrow, D., & Davids, K. (2013). Do the kinematics of a baulked take-off in springboard diving differ from those of a completed dive. *Journal of Sports Sciences*, 31(3), 305–313.
- Barris, S., Farrow, D., & Davids, K. (2014). Increasing functional variability in the preparatory phase of the takeoff improves elite springboard diving performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 85(1), 97–106.
- Dos Santos, K. B., Lara, J. P., & Rodacki, A. L. (2017). Reproducibility, repeatability and accuracy analysis of three-dimensional kinematics of the front crawl stroke trajectories in impaired swimmers. *Journal of Physical Education and Sport*, 17(1), 367–370.
- Fédération Internationale de Natation. (2022). *Diving Rules 2022 – 2025*. Retrieved from https://resources.fina.org/fina/document/2022/11/30/3f3df9e6-c41a-4853-b62e-6d57ff750150/1_Diving-Technical-Rules.03.12.2022_clean.pdf
- Hay, J. G. (1992). The biomechanics of the triple jump: A review. *Journal of Sports Sciences*, 10(4), 343–378.
- Huber, J. (2015). *Springboard and platform diving*. Human Kinetics.
- Kang, M. K., & Nam, S. W. (2010). Kinematic analysis of 303 (B) take-off in platform dives. *Journal of Exercise and Sport Science*, 16, 41–50.
- Kim, T. W., Kim, S. M., & Choi, S. H. (2019). Analysis of muscle activity and kinematic variables according to jump type of 3m springboard diving 109C skill-case study. *Korean Journal of Sport Science*, 30(4), 907–915.
- King, M. A., Kong, P. W., & Yeadon, M. R. (2023). Differences in the mechanics of takeoff in reverse and forward springboard somersaulting dives. *Sports Biomechanics*, 22(2), 255–267.
- Kong, P. W. (2005). *Computer simulation of the takeoff in Springboard Diving* [Doctoral Dissertation]. Loughborough University.
- Lee, C. H. (2008). A kinematical analysis of 205b motion in platform diving. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 18(1), 53–62.
- Lee, J. H. (2006). A kinematics analysis of inward 1½ somersault in platform dives. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 16(1), 139–149.
- Lee, J. T. (2011). Analysis of impulse force and kinematic factors of the limbs during Stefan Holm's take-off phase and penultimate stride of high jump. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 21(1), 97–105.
- Lees, A., Vanrenterghem, J., & De Clercq, D. (2004). Understanding how an arm swing enhances performance in the vertical jump. *Journal of Biomechanics*, 37(12), 1929–1940.
- McCormick, J. H., Subbaiah, P., & Arnold, H. J. (1982). A method for identification of some components of judging spring board diving. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 53(4), 313–322.
- Miller, D. I., Osborne, M. J., & Jones, I. C. (1998). Springboard oscillation during hurdle flight. *Journal of Sports Sciences*, 16(6), 571–583.
- Miller, D. I., Zecevic, A., & Taylor, G. W. (2002). Hurdle preflight in springboard diving: A case of diminishing returns. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 73(2), 134–145.
- Ministry of Culture, Sports and Tourism, & Korea Institute of Sport Science. (2021). *Sports Instructor Training Manual [Diving]*. Jinhan M&B.
- O'Brien, R. F. (2003). *Springboard and platform diving*. Human Kinetics.
- Oh, M. W., & Lee, B. K. (1995). Kinetic analysis of forward pike somersaulting in 3m springboard. *Journal of Exercise and Sport Science*, 1, 209–226.
- Park, J., & Yoon, S. (2017). Kinematic analysis of back somersault pike according to skill level in platform diving. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 27(3), 157–164.
- Sanders, R. H., & Gibson, B. J. (2000). Technique and timing in the womens forward two and one half somersault pike and mens three and one half somersault pike 3m springboard dives. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3(4), 434–448.
- Sanders, R. H., & Wilson, B. D. (1988). Factors contributing to maximum height of dives after takeoff from the 3m springboard. *International Journal of Sport Biomechanics*, 4(3), 231–256.
- Sinclair, P. J., Walker, C. A., & Rickards, T. (2012). Kinematic determinants of dive height in springboard diving. *Movement & Sport Sciences*, 75(1), 107–112.
- Slobounov, S., Yukelson, D., & O'Brien, R. (1997). Self-efficacy and movement variability of Olympic-level springboard divers. *Journal of Applied Sport Psychology*, 9(2), 171–190.
- Tylkowski, C. M., Simon, S. R., & Mansour, J. M. (1982). The Frank Stinchfield Award Paper. Internal rotation gait in spastic cerebral palsy. *The Hip*, 89–125.
- Walker, C. A., Sinclair, P. J., Cobley, S., Sanders, R., & Graham, K. S. (2014, October). A comparison of multiple forward somersault dives from the 3m springboard: A case study. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.
- Yang, J. H., & Eun, S. D. (2010). Analysis of body segmental contribution in standing vertical jump. *Journal of Sport for All*, 41(2), 645–652.

스프링보드 다이빙 시 허들스텝 성패에 따른 운동학적 분석

박지호¹, 윤석훈^{2*}

¹한국스포츠과학원 스포츠과학연구실, 연구원

²한국체육대학교 사회체육학과, 교수

*교신저자: 윤석훈(sxy134@knsu.ac.kr)

[목적] 본 연구는 스프링보드 다이빙 시 허들스텝 수행의 성공과 실패(보크)간의 운동학적 차이를 규명하고 성공적인 허들스텝 수행에 미치는 요인을 도출하기 위해 연구를 수행하였다.

[방법] 전국체육대회에 출전한 선수 중 성공적인 허들스텝과 보크를 수행한 10명(연령: 20.82 ± 2.75 세, 키: 170.09 ± 5.86 cm, 체중: 64.91 ± 5.63 kg, 경력: 11.64 ± 2.46 년)을 대상으로 수행하였으며, 전신무계중심(Whole-body Center of Mass, WCoM)의 위치, 속도, 기울기, 도약각도, 역학적 에너지, 역학적 일, 그리고 평균 충격력을 분석하였다. 통계분석은 성패 간 차이를 비교하기 위해 대응표본 t검정을 수행하였고, 허들스텝 성공을 예측하는 요인을 확인하기 위해 이항 로지스틱 회귀분석(forward LR 방식)을 실시하였다.

[결과] 분석 결과, 보드에 발이 닿는 순간(E1)에서 보크는 성공 동작에 비해 유의하게 낮은 역학적 에너지를 나타냈다($p < .05$). 또한, 스프링보드 반동구간(P2)에서는 성공동작이 보크보다 후방 방향의 평균 충격력이 유의하게 작았으며($p < .05$), 보드에서 발이 떨어지는 도약순간(E3)에서는 성공 동작이 보크보다 큰 전방 WCoM 속도($p < .05$), 더 수직에 가까운 시상면 WCoM 기울기($p < .05$), WCoM 도약각도($p < .05$), 그리고 유의하게 높은 역학적 에너지를 보였다($p < .05$). 또한 발구를 전체 구간(P3)의 역학적 일에서 성공 동작이 보크보다 더 크게 나타났다($p < .05$). 마지막으로 이항 로지스틱 회귀분석 결과, E3 시점의 역학적 에너지만이 허들스텝 성공을 유의하게 예측하는 변수로 확인되었다($p < .05$).

[결론] E3에서의 역학적 에너지가 허들스텝의 성공을 유의하게 예측하는 변수임을 보여주며, WCoM 속도, 기울기, 도약각도 등의 운동학적 특성을 기반으로 한 정량적 분석이 기술 수행 전략 수립에 유용함을 시사한다. 본 연구를 통해 허들스텝의 정량적 평가 기준을 제시함으로써 보크 발생을 줄이고, 선수들의 기술 안정성과 경기력 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어

다이빙, 스프링보드, 허들스텝, 역학적 에너지