

Original Article

Effects of Knee-Pelvis Coordination Sequence During Block Start on First Step Performance in Elite Sprint Athletes

Ho-Jong Gil*

Institute of Sport Science, Korea National Sport University

Article Info

Received 2025. 06. 15.

Revised 2025. 07. 21.

Accepted 2025. 08. 22.

Correspondence*

Ho-Jong Gil

gilhojong@gmail.com

Key Words

Block start, Coordination pattern,
Markerless motion analysis,
Sprint biomechanics

PURPOSE This study employed a markerless motion analysis system to categorize the block start of elite sprinters into a four-phase sequence and examined the relationship between the kinematic characteristics of each phase and first-step performance. **METHODS** Seven elite male sprinters (100 m personal best: 10.52 ± 0.14 s) participated in this study. Block start movements, from block clearance to first-step touchdown, were captured at 120 Hz. The collected video data were processed using Theia3D Markerless software. The block start motion was divided into four phases (P1–P4). For each phase, the following were analyzed: knee joint extension angular velocity in the sagittal plane, pelvic rotation angular velocity in the transverse plane, a coordination index, and a timing index. **RESULTS** Knee joint extension angular velocity differed significantly across the phases ($F=41.11, p<.001$), increasing rapidly after block clearance. Notably, the ability to maintain a high angular velocity through the initial flight phase (P3) was strongly positively correlated with normalized first-step length ($r=0.872, p<.05$). In contrast, the coordination index did not differ significantly across the phases. **CONCLUSIONS** During the block start, maximizing and maintaining knee extension angular velocity through P3 is a determinant of first-step performance. This phase-based analysis offers a scientific basis for training strategies focused on movement improvement in specific phases.

서론

단거리 스프린팅에서 블록 스타트는 경기 초반 가속력을 결정하고 최종 성과에 영향을 미치는 구간중 하나이다(Valamatos et al., 2022). 0.01초 차이로 순위가 갈리는 현대 육상에서, 출발 직후 첫 스텝까지의 초기 가속 능력은 전체 레이스 결과와 높은 상관관계를 보인다(Bezodis, 2009). 이 짧은 순간에 발생하는 운동학적 변인들의 특성을 이해하는 것은 경기력 향상을 위한 중요한 과제이다(Wild et al., 2023). 블록 스타트 동작은 단일한 움직임이 아닌, 블록을 떠나고(clearance), 공중에서 몸을 전진시키며(flight), 첫 발을 내딛는(touchdown) 등 생체역학적으로 뚜렷이 구분되는 여러 단계(phase)가 연속적으로 일어나는 복합적인 운동 시퀀스이다(Moura

et al., 2023). 각 단계는 고유한 목적과 움직임 특성을 가지므로, 이러한 단계별 변화를 체계적으로 분석하는 것이 필수적이다.

지난 연구들은 블록 스타트의 생체역학적 특성을 규명하기 위해 주로 개별 관절의 움직임이나 전체 동작 구간의 평균값 혹은 최대값과 같은 단일 지표에 초점을 맞추어 왔다(Ilbeigi et al., 2010; Valamatos et al., 2022). 예를 들어, 무릎 관절의 강력한 신전(extension)과 골반의 회전(rotation)이 스타트 퍼포먼스에 중요하다는 점은 널리 알려져 있다(Brazil et al., 2017). 그러나 이러한 접근법은 스타트 동작을 구성하는 각 단계의 고유한 운동학적 특성과 그 연속적인 변화를 포착하는 데 한계가 있었다. 즉, 블록 이탈 직후의 안정성 확보 단계와 최대 추진을 위한 비행 단계의 운동학적 요구사항은 명백히 다른데도, 이를 하나의 평균값으로 분석할 시 중요한 세부 시점의 정보를 놓칠 수 있다(Debaere, Delecluse et al., 2013). 이러한 방법론적 한계를 극복하기 위해, 최근 연구들은 스타트 동작을 여러 구간으로 나누어 분석하는 것의 중요성을 강조하고 있다(Colyer et al., 2019).

(CC) 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.

구체적으로, Nagahara et al.(2014)은 스타트의 각 단계마다 지면 반발력과 관절 운동의 기여도가 달라짐을 보고하였으며, Provini et al.(2020)은 스타트 초기와 후기의 협응 패턴이 질적으로 상이함을 밝혔다. 이는 스타트 동작이 시간에 따라 변화하는 동적인 과정임을 시사하며, 각 단계별 협응 패턴을 정량적으로 분석할 필요성을 제기한다. 특히, 시상면(sagittal plane)에서 일어나는 무릎의 신전은 신체를 전방으로 추진하는 주된 동력이며, 이는 상체의 강력한 팔 움직임으로부터 생성된 에너지가 수평면(transverse plane)에서의 골반 회전을 통해 하지로 전달되는 복잡한 연쇄 과정과 관련이 깊다(Sado et al., 2017). 이러한 관점에서 무릎과 골반의 단계별 비교 분석은 스타트 메커니즘을 깊이 이해하는 데 필요하다. 더불어, 최근 발전한 마커리스 동작 분석 기술은 선수에게 불편함을 주지 않고 실제 경기와 유사한 환경에서 데이터를 수집할 수 있는 새로운 가능성을 열어 주었다(Needham et al., 2021). 이는 온전히 경기상황과 유사한 퍼포먼스를 측정할 수 있다는 점에서 실험적 환경의 동작 제한 보다 현실성이 높다.

따라서 본 연구는 기존의 단일 지표 분석의 한계를 넘어, 블록 스타트 동작을 생체역학적 이벤트에 기반한 4개의 연속된 구간으로 나누어 분석하고자 하였다. 마커리스 동작 분석 시스템을 활용하여, 각 구간별 무릎 신전 각속도와 골반 회전 각속도의 크기(RMS) 및 두 움직임 간의 시간적 관계를 정량화하고, 이러한 구간별 특성이 첫 스텝 수행력(정규화된 첫 스텝 길이)과 어떠한 관계를 맺는지 규명하는 것을 목적으로 하였다. 본 연구의 구간 기반 분석(phase-based analysis)은 스타트 동작의 동적 특성에 대한 심도 있는 이해를 제공하고, 특정 구간의 움직임 개선을 목표로 하는 훈련 전략 수립에 과학적 근거를 제시할 것이다.

연구방법

연구대상

본 연구의 대상자는 최근 3개월 이내에 부상 경험이 없고, 최근 2개월 이내 전국대회 5위 이내 진입 경력이 있는 K대학 육상부 소속 남자 단거리 선수 7명(신장: 177.8 ± 4.5 cm, 체중: 71.9 ± 4.2 kg, 연령: 22.1 ± 1.7 yrs, 경력: 8.7 ± 2.3 yrs)을 선정하였다. 모든 연구 대상자는 주 6회 이상 전문적 훈련을 수행하고 있으며, 100m 개인 최고기록이 10.80초 이내(평균 10.52 ± 0.14 초)로 대한육상경기연맹에 등록된 엘리트 선수들이다. 본 연구에 참여한 모든 대상자는 실험 전 연구의 목적과 절차에 대한 설명을 듣고 자발적으로 참여 동의를 작성하여 모집되었다.

실험절차

본 연구의 실험은 K대학교 육상경기장의 공인 몬도트랙에서 진행되었으며, 비디오 기반 마커리스 모션 캡처 시스템을 활용하여 블록 스타트부터 첫 스텝 착지까지의 3차원 운동학적 데이터를 수집하였다. 마커리스 동작 분석을 위해 DSC-RX0M2 및 동기화 콘솔 박스 CCB-WD1 10대(해상도: 1920×1080 p, 촬영속도: 120 Hz)를 스타트 라인 주변에 배치하였으며, 카메라는 블록 후방 1m부터 전방 5m까지의 영역을 포착할 수 있도록 스타트 라인 양측에 각 5대씩 반



Fig. 1. Markerless motion-capture setup

원형 구조로 배치하였다(Fig. 1).

실험 전 오브젝트 캘리브레이션 방식으로 3차원 좌표계를 설정하였으며, 진행 방향을 Y축(+), 좌우 방향을 X축(우측 +), 수직 방향을 Z축(위쪽 +)으로 정의하였다. 모든 연구 대상자는 개인이 선호하는 방식으로 30분간 준비운동을 실시하였으며, 스파이크와 경기용 타이즈를 착용하고 실험에 참여하였다. 각 대상자는 공인 심판의 '제자리에', '차렷', '출발 총소리'에 맞춰 30m 최대 전력 스프린팅을 수행하였으며, 모든 대상자는 총 3회의 스타트 기회가 주어졌고 완전 회복을 위해 15분의 휴식 시간이 제공되었다. 대상자의 피로 축적을 방지하기 위해 시간차를 두고 순차적으로 스타트를 실시하였다. 총 3회의 시도 중 가장 빠른 1회의 시도를 최종 분석 동작에 사용하였다.

자료처리

수집된 영상 데이터는 Theia3D Marker less 소프트웨어(Theia3D Markerless Inc., Canada)를 통해 1차적으로 처리되었다. 이 소프트웨어는 딥러닝 기반 컴퓨터 비전 알고리즘을 활용하여 별도의 마커 부착 없이 인체 관절과 분절의 3차원 위치를 추적할 수 있으며, 21개의 주요 관절점을 추적하였다. 추적된 원시 데이터는 Visual3D 소프트웨어(Has-Motion Inc., USA)로 이전하여 인체해부학적 모델을 구축하였고, 하지관절 및 골반 분절에 한하여 운동학 변인을 계산하였다. 데이터 처리 과정에서 발생하는 오차를 최소화하기 위해 4차 Butterworth 저역 통과 필터(차단 주파수: 6 Hz; Bae, 2006)를 적용하였다. Visual3D에서 각 이벤트 및 구간별 변인들을 계산하였으며, 이후 모든 운동학적 분석 결과는 Python 3.10 환경에서 추가 처리 및 통계 분석을 위해 추출한 후 처리하였다. 이를 통해 각 구간별 주요 관절 각도, 각속도 및 협응 패턴 분석이 수행되었으며, 각 변인의 시간적 변화 패턴을 정량화하였다.

분석구간

본 연구에서는 블록스타트부터 첫 스텝 착지까지의 동작을 생체역학적 특성에 따라 5개의 주요 이벤트와 이들 간의 4개 구간으로 구분하여 분석하였다(Fig. 2). 주요 이벤트는 E1(손가락이 지면에서 떨어지는 순간), E2(뒷발의 발끝이 지면에서 떨어지는 순간), E3(앞쪽 블록 발끝이 떨어지는 순간), E4(체중 중 추진 뒷 발 무릎의 각도가 굴곡으로 바뀐 시점), E5(첫 스텝 착지 발가락이 지면에 닿는 순간)으로 정의

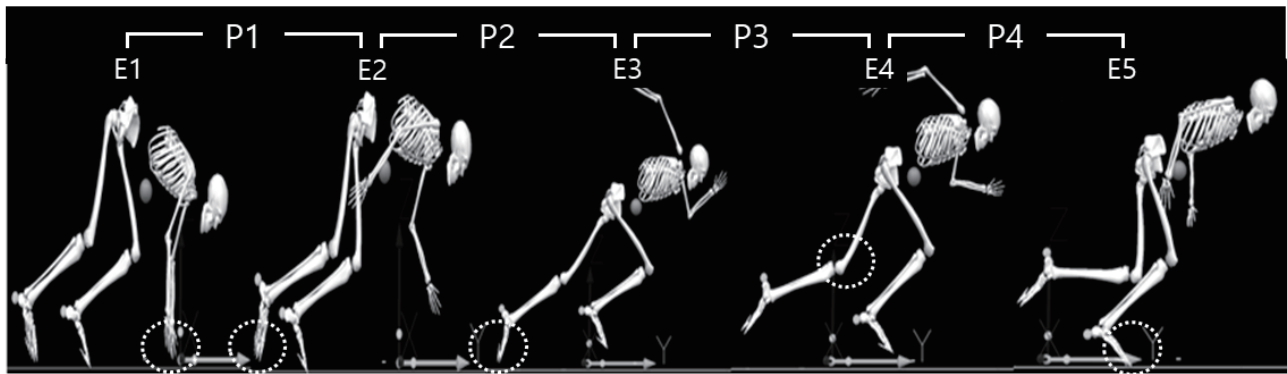


Fig. 2. Event-phase definition for the block start

하였다. 이러한 이벤트들 사이의 구간은 Phase 1~4로 설정하였다.

분석변인

블록스타트 동작은 매우 짧은 시간(약 0.5초 이내) 동안 급격한 운동학적 변화가 발생하는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 골반 분절의 수평면(transverse plane) 회전 각속도와 무릎 관절의 시상면(sagittal plane) 신전 각속도를 주요 변인으로 분석하였다. 따라서 각 단계별 특성을 정량화하기 위해 다음과 같은 분석 변인들을 설정하였다.

무릎과 골반의 평균적 각속도 크기(RMS)

각 단계에서 무릎 관절과 골반 분절의 회전 운동은 순간적으로 폭발적인 변화 패턴을 보인다. 이러한 변화는 각속도 데이터를 각 구간별로 하나의 대표값으로 요약하기 위해 RMS(Root Mean Square) 방법을 사용하였다. RMS는 시간에 따라 변화하는 신호의 평균적인 크기를 나타내는 지표로, 각 구간에서의 전반적인 회전 운동 강도를 정량화하는데 유용하다(Llopis-Alber et al., 2021).

협응 지수(Coordination Index, CI)

각 분석 구간 내에서 무릎 신전 각속도와 골반 회전 각속도의 시계열 패턴 유사성을 평가하기 위해 협응 지수를 산출하였다. 상호상관(cross-correlation) 분석은 두 시계열 신호 간의 유사성을 객관적으로 측정하는 신호 처리 방법으로, 운동역학 분야에서 관절 간 협응을 정량화하는 데 사용되어 왔다(Dubois et al., 2023). 본 연구에서는 z-점수로 정규화된(normalized; 진폭 표준화) 두 각속도 시계열 데이터를 사용하여 모든 시간 지연(time lag)에 걸친 상호상관 계수를 계산하였다. 최종적으로, 이 상호상관 시퀀스에서 나타나는 절댓값의 최댓값(maximum absolute cross-correlation coefficient)을 해당 구간의 협응 지수로 정의하였다. 이 지수는 0과 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 시간 지연을 고려했을 때 두 움직임의 패턴이 매우 유사함을 의미한다. 이러한 접근법은 두 시계열 간의 실제 위상차를 객관적으로 측정하는 최대값을 식별하는 방법으로 제안된 바 있다(Li & Caldwell, 1999). 즉, 이 지수는 두 움직임의 동시

성(simultaneity)보다는, 하나의 움직임이 다른 하나를 약간 선행하거나 후행하더라도 나타낼 수 있는 패턴의 유사성 정도를 정량화하는데 목적이 있다.

타이밍 지수(Timing Index, TI)

무릎과 골반의 최대 각속도가 발생하는 시점의 차이를 분석하여, 두 관절 움직임의 시간적 순서를 정량화하였다. 이 지수는 각 단계 지속 시간에 대한 백분율로 표현되며, 어느 관절이 먼저 최대 속도에 도달하는지, 그 시간차가 얼마나 되는지를 나타낸다. 이는 운동 시퀀스의 시간적 조율 특성을 이해하는 정량적 정보가 될 수 있다(Donaldson et al., 2022).

정규화된 첫 스텝 길이(NSL)

첫 스텝 길이는 E2 시점에서 뒤쪽 블록 발가락 위치와 첫 스텝 착지 시점에서의 위치 간의 진행방향 거리로 정의하였다. 선수들의 신장 차이를 고려하여 각 선수의 신장으로 나누어 정규화함으로써, 체격 차이에 관계없이 비교 가능한 표준화된 스텝 길이를 산출하였다(Debaere et al., 2013, See Eq. 1).

$$\omega_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} \left[\frac{\theta(i+1) - \theta(i-1)}{2\Delta t} \right]^2}$$

$$CI = \max[corr(\omega_{KE}, \omega_{PR})]$$

$$TI = \frac{|T_{KEmax} - T_{PRmax}|}{\text{단계지속시간}} \times 100$$

$$NSL = \frac{FSL}{\text{신장}}$$

이때, ω_{RMS} 는 각속도의 RMS 값(deg/s), $\theta(i)$ 는 i 번째 프레임의 관절 각도(deg)[$\theta_{KE}(i)$ 는 무릎관절 신전 각도, $\theta_{PR}(i)$ 는 골반 수평 회전 각도]이며, ω_{KE} 는 무릎관절 신전 각속도의 RMS, ω_{PR} 는 골반 수평 회전 각속도의 RMS, n 은 해당 구간의 총 프레임 수, Δt 는 샘플링 간격(1s/120hz), CI는 협응 지수, TI는 타이밍 지수(%), T_{KEmax} 는 무릎관절 신전 각속도의 최대값 발생 시점, T_{PRmax} 는 골반 회전 각

속도의 최대값 발생 시점, NSL은 표준화된 첫 스텝 길이, FSL은 첫 스텝 길이(m)이다.

통계 처리

모든 통계 분석은 Python(ver. 3.10)을 활용하여 수행하였으며, 소표본($n=7$)의 특성을 고려하여 효과 크기 중심의 해석을 실시하였다. 4개의 연속된 단계 간 변인의 차이를 분석하기 위해 반복측정 일원분산분석(one-way repeated measures ANOVA)을 실시하였다. 분석에 앞서, Shapiro-Wilk 검정을 통해 데이터의 정규성을 확인하였으며, Mauchly의 검정을 통해 구형성(sphericity) 가정을 검토하였다. 구형성 가정이 위배될 경우, Greenhouse-Geisser 보정치를 사용하여 F값과 유의확률을 보정하였다. 주효과가 통계적으로 유의할 경우, Bonferroni 방법을 적용한 쌍대비교(pairwise comparisons)를 통해 단계별 차이를 확인하였다. 효과 크기는 편 에타 제곱(Partial Eta Squared)으로 보고하였으며, 통계적 유의수준은 $\alpha=0.05$ 로 설정하였다.

연구결과

본 연구에서는 블록스타트부터 첫 스텝 착지까지의 동작을 4단계 시

퀸스로 구분하여 무릎-골반의 운동학적 특성을 분석하였다. 반복측정 분산분석 결과, 무릎과 골반의 각속도는 구간에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보인 반면, 협응 및 타이밍 관련 지수에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

무릎관절 신전 각속도(ω_{KE})는 단계별로 가장 뚜렷한 차이를 나타냈으며($p<.001$), 사후 분석 결과 모든 구간 간에 유의한 차이가 있는 것으로 확인되었다. 각속도는 P1($87.86 \pm 28.71^\circ/\text{s}$)에서 P4($590.93 \pm 151.16^\circ/\text{s}$)까지 약 7배 증가하며 단계적으로 운동 강도가 극적으로 변화하는 패턴을 보였다. 골반 수평 회전 각속도(ω_{PR}) 역시 구간별로 유의한 차이를 보였으나($F=6.70, p=.003$), 사후 분석 결과 P1과 후반 구간(P2, P4 등) 사이에서만 유의한 차이가 나타나, P2 이후부터는 비교적 일정한 회전 속도를 유지하는 것으로 나타났다.

반면, 최대 절댓값 상호상관 계수로 정의된 협응 지수(CI)와 최대 각속도 도달 시점 차이를 나타내는 타이밍 지수(TI)는 구간에 따른 통계적으로 유의한 차이가 관찰되지 않았다($p>.05$). 이는 두 관절 움직임의 패턴 유사성이나 시간적 순서가 구간별로 급격히 변하기보다는 개인별로 일관된 특성을 보일 수 있음을 시사한다(Fig. 3). 단계별 주요 변인의 기술통계 및 분산분석 결과는 <Table 1>과 같다.

각 단계별 운동학적 변인과 정규화된 첫 스텝 길이(NSL) 간의 피어슨 상관분석 결과, P3 구간에서의 무릎관절 신전 각속도가 첫 스텝 길이와 통계적으로 유의하며 강한 양의 상관관계($r=0.872, p=.011$)를

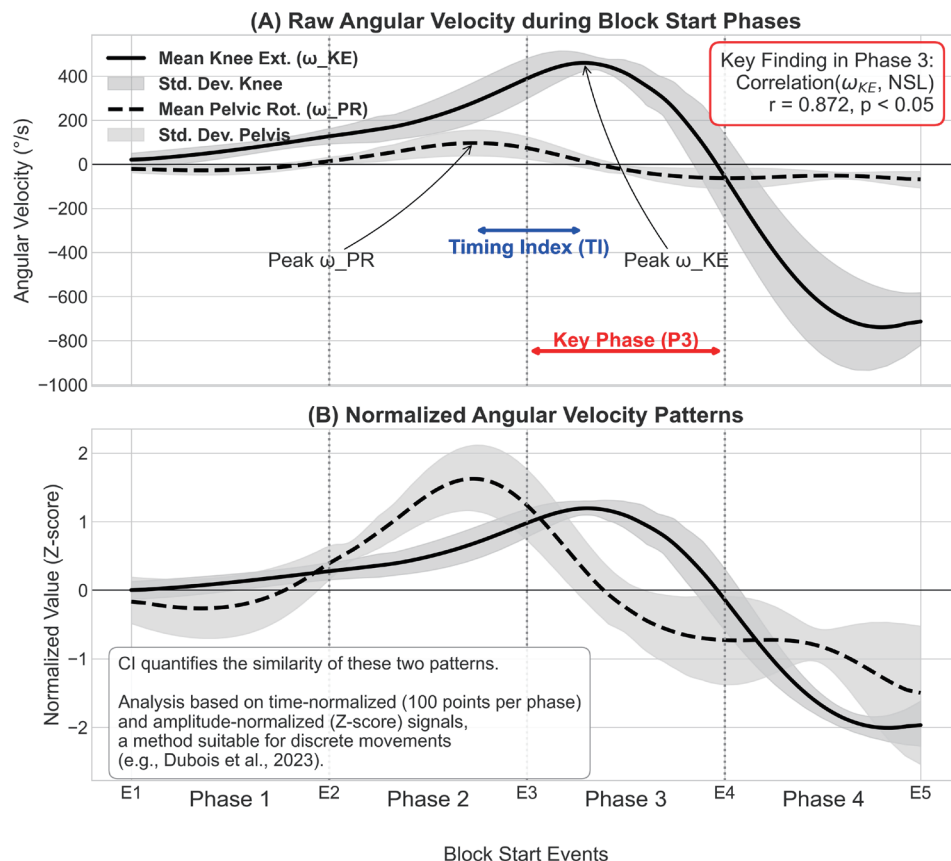


Fig. 3. Knee and pelvis angular-velocity patterns during the block start. A) Raw data with key statistical annotations. B) Amplitude-normalized data for pattern comparison

Table 1. Descriptive statistics and repeated-measures ANOVA of block-start kinematics

Variables	P1	P2	P3	P4	F	p	η^2	Post-Hoc
ω KE(°/s)	87.86±28.71*	344.76±61.74*	232.63±50.14*	590.93±151.16*	41.11	0.001	0.840	$P1 < P2 < P4$, $P1 < P3, P3 < P4$
ω PR(°/s)	26.12±14.21*	66.14±42.72*	54.01±38.36	64.91±18.92*	6.70	0.003	0.239	$P1 < P2, P1 < P4$
CI	0.83±0.12	0.85±0.06	0.96±0.07	0.83±0.10	1.32	0.328	0.291	
TI(%)	19.66±28.82	41.30±15.44	49.08±34.95	39.95±32.95	1.27	0.316	0.140	

* $p < .05$ **Table 2.** Correlations of block-start kinematics with normalized step length (NSL)

Variables	P1	P2	P3	P4
ω KE(°/s)	0.236 (.610)	0.099 (.834)	0.872* (.011)	-0.607 (.149)
ω PR(°/s)	0.038 (.935)	0.057 (.904)	0.303 (.509)	0.200 (.668)
CI	-0.173 (.711)	-0.063 (.894)	-0.706 (.076)	0.251 (.587)
TI(%)	-0.502 (.252)	0.164 (.725)	0.059 (.901)	0.326 (.476)

* $p < .05$

나타냈다. 이는 체공 구간에서의 폭발적인 무릎 신전 능력이 첫 스텝의 보폭을 결정하는 핵심적인 요인임을 의미한다. 그 외 다른 구간의 어떤 변수도 첫 스텝 길이와 유의한 상관관계를 보이지 않아, P3 구간 무릎 신전의 특이적인 중요성이 확인되었다(Table 2).

논 의

본 연구는 엘리트 단거리 선수의 블록스타트부터 첫 스텝 착지까지의 과정을 4단계의 시퀀스로 구분하고, 각 단계별 무릎-골반의 운동학적 특성이 첫 스텝 성과에 미치는 영향을 규명하고자 수행되었다. 기존 연구들이 주로 전체 구간의 평균값이나 최대값에 의존한 분석에 머물렀다면(Colyer et al., 2018), 본 연구는 구간별 동적인 변화를 분석함으로써 블록스타트 메커니즘에 대한 단계적 상황을 분석하고자 하였다. 소표본($n=7$)이라는 한계에도 불구하고, 100m 개인 최고기록 10.52 ± 0.14 초인 국내 최상위급 선수들을 대상으로 한 본 연구의 결과는 경기력 향상을 위한 실질적인 적용 가치를 지닐 수 있다고 판단된다.

본 연구의 가장 핵심적인 발견은, 분석된 여러 운동학적 변수 중 오직 체공 국면 중 무릎 신전이 지속되는 초기 단계(P3)에서의 무릎 신전 각속도만이 첫 스텝 성과와 매우 강력한 정적 상관관계($r=0.872$)를 보였다는 점이다. 이는 블록스타트의 성패가 전체 구간의 평균적인 움직임이 아닌, '특정 구간'에서의 '특정 움직임'에 의해 결정될 수 있다는 시간적 특이성 원리(temporal specificity principle)를 강력하게 지지한다(Bezodis, 2019). 선행 연구들 역시 스타트 전체 구간의 평균 무릎 신전 속도가 성과와 관련이 있음을 보고한 바 있으나($r \approx$

0.5-0.6; Ota et al., 2024), 본 연구는 지면의 제약에서 완전히 벗어나 신체가 공중에 떠 있는 무릎 신전 비행 구간(P3)에서의 순수한 전진 추진 능력이 성과를 예측하는 데 훨씬 더 중요한 변수임을 밝혀냈다는 점에서 차별점을 갖는다. 이는 지면반발력을 활용할 수 없는 상황에서, 오직 신체 분절의 가속만으로 수평 속도를 유지하고 증폭시키는 능력이 엘리트 선수의 스타트 효율성을 가늠하는 결정적 지표임을 의미한다.

흥미롭게도, 무릎 신전 각속도는 모든 구간에 걸쳐 극적인 변화를 보인 반면($p < .001$), 골반 회전 각속도는 초기 추진 구간(P1) 이후 비교적 안정적인 패턴을 유지했다. 이는 두 분절의 기능적 역할 분담을 시사한다. 즉, 골반은 상체에서 생성된 회전력을 하지로 전달하는 안정적인 회전 플랫폼(rotating platform) 역할을 수행하고(Sandamas et al., 2020), 실제적인 폭발적 추진력은 무릎 관절의 강력한 신전 동작을 통해 발현되는 것으로 해석할 수 있다. 일부 연구에서는 골반의 빠른 회전이 스타트 속도에 기여한다고 보고했지만(Brazil et al., 2017), 이는 스타트 초기 단계에 국한된 현상일 수 있다. 본 연구 결과는 수평 속도가 확보된 P2 이후부터는 골반이 과도하게 회전하기보다 안정성을 유지하며 무릎의 움직임을 효과적으로 지지하는 것이 더 중요할 수 있다는 가설을 제시한다.

한편, 본 연구의 초기 예상과 달리, 구간별 협응 지수(CI)와 타이밍 지수(TI)는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 스타트와 같이 폭발적인 동작에서는, 각 선수별 순간적 패턴이 전체 시퀀스에 걸쳐 일관되게 적용하고 있을 가능성을 제기한다. 즉, 협응의 질은 구간별로 역동적으로 변하는 전략이라기보다, 선수 개인의 고유한 특성(motor signature)일 수 있다는 것이다(Glazier & Davids, 2009). 기술통계상 P3 구간에서 가장 높은 평균 협응 지수(0.94)가 나타난 것은, 지면의 제약이 없는 상태에서 두 관절의 움직임이 가장 조화롭게 나타나는 경향성을 보여주지만, 선수 개인의 고유한 패턴 차이로 인한 분산이 커 통계적 유의성에는 도달하지 못했다. 이는 소표본으로 인한 통계적 검정력의 한계일 수 있으며, 향후 더 많은 표본을 통해 검증될 필요가 있다.

본 연구 결과는 현장 지도에 중요한 시사점을 제공한다. 많은 지도자들이 스타트 시 "블록을 강하게 밀어라"고 강조하지만, 본 연구는 블록을 떠난 직후의 공중 동작, 특히 무릎 신전이 지배적인 비행 초기 국면(P3)에서 스윙하는 다리의 무릎을 얼마나 빠르고 강력하게 전방으로 뻗어주는가가 초기 가속의 성패를 가르는 숨겨진 핵심 요인임을 확인할 수 있었다. 이는 스타트 훈련이 단순히 지면을 밟는 힘뿐만 아니라, 공중단계에 이르기까지 신체 분절을 효율적으로 가속시키는 능력에 초점을 맞추어야 함을 의미한다.

결론 및 제언

본 연구는 엘리트 단거리 선수의 블록스타트를 4단계 시퀀스로 분석하여 무릎-골반의 운동학적 특성과 첫 스텝 성과와의 관계를 규명하였다. 연구 결과, 무릎 신전 각속도는 P1에서 P4 단계로 진행됨에 따라 통계적으로 유의하게 증가하였으며, 특히 체공 국면 중 무릎 신전이 지속되는 초기 단계(P3)에서의 무릎 신전 각속도가 첫 스텝 길이와 매우 강한 정적 상관관계를 보여, 이 특정 구간의 움직임이 초기 가속 성능에 기여하는 핵심 요인임을 확인하였다. 결론적으로, 본 연구의 시간적 시퀀스 기반 분석은 기존의 평균값 중심 접근법을 보완하여 보다 세분화된 관점을 제공하였으며, 특히 무릎 신전 비행 구간(P3)에서의 각속도 향상을 위한 특화된 훈련 프로그램 개발과 선수 개개인의 기술을 분석하는 데 현장에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 표본 크기를 확대하고, 상지 동작과의 협응 패턴을 통합적으로 분석하는 등의 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

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: Ho-Jong Gil, Data curation: Ho-Jong Gil, Formal analysis: Ho-Jong Gil, Methodology: Ho-Jong Gil, Project administration: Ho-Jong Gil, Visualization: Ho-Jong Gil, Writing-original draft: Ho-Jong Gil, Writing-review & editing: Ho-Jong Gil

참고문헌

- Bezodis, N. (2009). *Biomechanical investigations of sprint start technique and performance* [Doctoral dissertation]. University of Bath.
- Bezodis, N. E., Willwacher, S., & Salo, A. (2019). The biomechanics of the track and field sprint start: A narrative review. *Sports Medicine*, 49(9), 1345-1364.
- Brazil, A., Exell, T., Wilson, C., Willwacher, S., & Irwin, G. (2017). Lower limb joint kinetics in the starting blocks and first stance in athletic sprinting. *Journal of Sports Sciences*, 35(17), 1629-1635.
- Colyer, S. L., Graham-Smith, P., & Salo, A. (2019). Analysis of sprint start transition phases and their associations with performance. *ISBS Proceedings Archive*, 37(1), Article 495.
- Colyer, S. L., Nagahara, R., & Salo, A. I. (2018). Kinetic demands of sprinting shift across the acceleration phase: Novel analysis of entire force waveforms. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(7), 1784-1792.
- Debaere, S., Delecluse, C., Aerenhouts, D., Hagman, F., & Jonkers, I. (2013). From block clearance to sprint running: Characteristics underlying an effective transition. *Journal of Sports Sciences*, 31(2), 137-149.
- Debaere, S., Jonkers, I., & Delecluse, C. (2013). The contribution of step characteristics to sprint running performance in high-level male and female athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(1), 116-124.
- Donaldson, B., Bezodis, N., & Bayne, H. (2022). Inter- and intra-limb coordination during initial sprint acceleration. *Biology Open*, 11(10), bio059501.
- Dubois, O., Roby-Brami, A., Parry, R., Khoramshahi, M., & Jarrassé, N. (2023). A guide to inter-joint coordination characterization for discrete movements: a comparative study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20(1), 132.
- Glazier, P. S., & Davids, K. (2009). Constraints on the complete optimization of human motion. *Sports Medicine*, 39(1), 15-28.
- Ilbeigi, S., Hagman, F., & Van Gheluwe, B. (2010). Velocity and starting block variables during a 30 m sprint run. *British Journal of Sports Medicine*, 44(Suppl 1), i25.
- Jacobs, R., & van Ingen Schenau, G. J. (1992). Intermuscular coordination in a sprint push-off. *Journal of Biomechanics*, 25(9), 953-965.
- Kesoglou, I., Zacharogiannis, E., Smirniotou, A., Arampatzi, F., Paradisis, G., Argeitaki, P., Pilianidis, T., & Tsolakis, C. K. (2016). Acute effects of specific actions after the "On your Marks" command. *Journal of Biology of Exercise*, 12(1), 55-67.
- King, D., Burnie, L., Nagahara, R., & Bezodis, N. (2023). Relationships between kinematic characteristics and ratio of forces during initial sprint acceleration. *Journal of Sports Sciences*, 41(6), 549-557.
- Li, L., & Caldwell, G. E. (1999). Coefficient of cross correlation and the time domain correspondence. *Journal of Electromyography* and *Kinesiology*, 9(6), 385-389.
- Llopis-Albert, C., Venegas Toro, W. R., Farhat, N., Zamora-Ortiz, P., & Page Del Pozo, Á. F. (2021). A new method for time normalization based on the continuous phase: Application to neck kinematics. *Mathematics*, 9(23), 3138.
- Martínez-Sobrino, J., Navia, J. A., Del Campo-Vecino, J., Jiménez-Reyes, P., & Veiga-Fernández, S. (2023). A New Index to Evaluate Running Coordination Based on Notational Analysis. *Journal of sports science & medicine*, 22(4), 790.
- Meng, Y., Bíró, I., & Sárosi, J. (2023). Markerless measurement techniques for motion analysis in sports science. *Analecta Technica Szegedinsia*, 17(1), 61-70.
- Merni, F., Cicchella, A., Ciacci, S., Bombardi, F., Magenti, L., Olmucci, A., & Coppini, L. (1992). Kinematic and dynamic analysis of sprint start. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.
- Moura, T. B. M. A., Leme, J. C., Nakamura, F. Y., Cardoso, J. R., & Moura, F. A. (2023). Determinant biomechanical variables for each sprint phase performance in track and field: A systematic review. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 19(2), 806-823.
- Nagahara, R., Mizutani, M., Matsuo, A., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2014). Association of joint torques with ground reaction forces during sprint starts. *European Journal of Applied Physiology*, 114(8), 1739-1745.
- Needham, L., Evans, M., Cosker, D., & Colyer, S. (2021). Development, evaluation and application of a novel markerless motion analysis system to understand push-start technique in elite skeleton athletes. *PLoS One*, 16(11), e0259624.
- Ota, K., Yoshida, T., Furuhashi, Y., Muratomi, K., Maemura, H., & Tanigawa, S. (2024). A longitudinal study of three-dimensional pelvic behaviour in maximal sprint running. *Scientific Journal of Sport and Performance*, 3(3), 370-382.
- Pataký, T. C., Vanrenterghem, J., & Robinson, M. A. (2016). The probability of false positives in zero-dimensional analyses of one-dimensional kinematic, force and EMG trajectories. *Journal of biomechanics*, 49(9), 1468-1476.
- Petrescu, T. D. (2019). Biomechanical details regarding the efficiency of start in sprinting events. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series IX: Sciences of Human Kinetics*, 113-120.
- Provini, P., Toussaint, H. M., & Savelberg, H. H. (2020). Coordination patterns in sprint start phases: temporal segmental analysis. *Sports Biomechanics*, 19(2), 135-148.
- Rodrigues, C., Correia, M., Abrantes, J., Rodrigues, M., & Nadal, J. (2023, May). Cross-Correlation of Lower Limb Joint Angular Kinematic Signal for Coordination Assessment During Impulse Phase on Standard Maximum Vertical Jump. In *Congress of the Portuguese Society of Biomechanics (pp. 565-575)*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Sado, N., Yoshioka, S., & Fukushima, S. (2017). The three-dimensional kinetic behaviour of the pelvic rotation in maximal sprint running. *Sports Biomechanics*, 16(2), 258-271.

- Sandamas, P., Gutierrez-Farewik, E., & Arndt, A. (2020).** The relationships between pelvic range of motion, step width and performance during an athletic sprint start. *Journal of Sports Sciences*, 38(19), 2200-2207.
- Swann, C., Schweickle, M. J., & Vella, S. A. (2024).** Advocating individual-based profiles of elite athletes to capture the multifactorial nature of elite sports performance. *Scientific Reports*, 14, 26977.
- Tønnessen, E., Haugen, T., & Shalfawi, S. A. I. (2013).** Reaction time aspects of elite sprinters in athletic world championships. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(4), 885-892.
- Valamatos, M. J., Abrantes, J., Carnide, F., Valamatos, M.-J., & Monteiro, C. (2022).** Biomechanical performance factors in the track and field sprint start: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 4074.
- Wang, L., Wang, W., Li, S., & Zhang, H. (2023).** Stride length mediates the correlation between movement coordination and sprint velocity. *Journal of Sports Sciences*, 41(1), 72-79.
- Wild, J., Bezodis, I. N., North, J. S., & Bezodis, N. E. (2023).** Enhancing the initial acceleration performance of elite rugby backs. Part II: Insights from multiple longitudinal individual-specific case-study interventions. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(11), 1271-1281.

엘리트 단거리 선수의 블록스타트 무릎-골반 협응 시퀀스가 첫 스텝 성과에 미치는 영향

길호중*

한국체육대학교, 체육과학연구소, 연구원

*교신저자: 길호중(gilhojong@gmail.com)

[목적] 본 연구의 목적은 마커리스 동작 분석 시스템을 활용하여 엘리트 단거리 선수의 블록스타트를 4단계 시퀀스로 구분하고, 각 단계별 무릎-골반의 운동학적 특성이 첫 스텝 성과와 맺는 관계를 규명하는 것이다.

[방법] 국내 엘리트 남자 단거리 선수 7명(100m 개인 최고기록: 10.52 ± 0.14 초)을 대상으로 블록스타트부터 첫 스텝 착지까지의 동작을 120Hz로 촬영하였다. 수집된 영상은 Theia3D Markerless 소프트웨어로 처리하였으며, 블록스타트 동작을 4단계(P1-P4)로 구분하여 무릎관절 시상면 신전 각속도, 골반 수평면 회전 각속도, 협응 지수, 타이밍 지수를 분석하였다.

[결과] 무릎관절 신전 각속도는 단계별로 통계적으로 유의한 차이를 보였으며($F=41.11$, $p<.001$), 블록 이탈 직후부터 급격히 증가하였다. 특히, 체공 국면 중 무릎 신전이 지속되는 초기 비행 구간(P3)까지 높은 각속도를 유지하는 능력이 정규화된 첫 스텝 길이와 강한 양의 상관관계를 나타냈다($r=0.872$, $p<.05$). 반면, 협응 지수는 구간에 따른 유의한 차이를 보이지 않았다.

[결론] 블록스타트 시, 초기 비행 구간(P3)까지 무릎 신전 각속도를 극대화하고 유지하는 것이 첫 스텝 성과를 결정하는 주요 요인임이 확인되었다. 이러한 시퀀스 기반 분석은 특정 구간의 움직임 개선을 목표로 하는 훈련 전략 개발에 과학적 근거를 제공한다.

주요어

블록 스타트, 협응 패턴, 마커리스 동작분석, 단거리 생체역학