

Biomechanical Analysis of Human Stability According to Running Speed: A Comparative Analysis of Lyapunov Exponent and Coefficient of Variation Methods

달리기 속도에 따른 인체 안정성의 생체역학적 분석: 리아프노프 지수와 변이계수 방법의 비교 분석

Ho-Jong Gil

Fila Advanced Science and Technology Center, FILA Holdings, Busan, South Korea

Received : 09 March 2023

Revised : 21 March 2023

Accepted : 21 March 2023

Corresponding Author

Ho-Jong Gil

Advanced Technology Team /
FAST Center / FILA Holdings
Corp. 6F, Footwear Cutting
Edge Hub Center Bldg, 235,
Nakdong-daero 943 beon-gil,
Sasang-gu, Busan, 47030,
South Korea

Email : hjgil@fila.com

Objective: The purpose of this study was to examine the effects of increasing running speed on human stability by comparing the Lyapunov Exponent (LyE) and Coefficient of Variation (CV) methods, with the goal of identifying key variables and uncovering new insights.

Method: Fourteen adult males (age: 24.7 ± 6.4 yrs, height: 176.9 ± 4.6 cm, weight: 74.7 ± 10.9 kg) participated in this study.

Results: In the CV method, significant differences were observed in ankle (flexion-inversion/eversion; $p < .05$) and hip joint (internal-external rotation; $p < .05$) movements, while the center of mass (COM) variable in the coronal axis movements showed a significant difference at the $p < .001$ level. In the LyE method, statistical differences were observed at the $p < .05$ level in knee (flexion-extension), hip joint (internal-external rotation) movements, and COM across all three directions (sagittal, coronal, and transverse axis).

Conclusion: Our results revealed that the stability of the human body is affected at faster running speeds. The movement of the COM and ankle joint were identified as the most critical factors influencing stability. This suggests that LyE, a nonlinear time series analysis, should be actively introduced to better understand human stabilization strategies.

Keywords: Running speed, Stability, Lyapunov Exponent, Coefficient of Variation, Nonlinear time series analysis

INTRODUCTION

인간은 걷기 및 달리기와 같은 이동 운동을 반복적으로 수행하며 일생을 영위한다(Ryu, 2009). 이러한 반복적인 이동 움직임은 개인이 선호하는 환경, 습관, 훈련 등에 영향을 받아 자신만의 패턴을 이루게 되며 독창성을 갖는다(Dingwall,

Cusumano, Sternad & Cavanagh, 2000). 이처럼 고유한 영역 안에서 이루어지는 차별적인 변화에 대해 여러 연구자들은 특수한 계 내의 존속적 특성으로 인식하고 그 특수성을 구명하려는 다양한 시도들을 해왔다(Hausdorff, Forman & Ladin, 1994; Maki, 1997; Heiderscheidt, Hanill & Van Emmerik, 2002; Schache, Blanch, Dorn, Brown, Rosemond & Pandy, 2011). 특

히, 달리기는 전신을 보다 빠르게 움직여 특정 공간으로 이동하려는 연속적인 시도로 볼 수 있는데, 편안하고 안정적인 걷기에 비해서 근 활성 정도와 움직임 변화량이 커지기 때문에(Murley, Landorf, Menz & Bird, 2009; Vermillo et al., 2020), 개인별 고유한 계 내의 특성이 초래할 수 있는 위험성과 패턴이 의미하는 바를 명확히 이해할 필요가 있다.

Mehdizadeh, Arshi와 Davids (2014)은 달리기의 안정성을 분석하는 것이 주자의 균형을 유지하고 낙상을 예방하고 스포츠의 동적 환경에서 움직임 기능을 향상시킬 수 있는 방법이 될 수 있다고 하였으며, Cappellini, Ivanenko, Poppele 및 Lacquaniti (2006), 그리고 Sasaki와 Neptune (2006)은 달리기가 보행과 다른 역학적 특성으로 인하여 개별적인 제어 전략이 필수적이라고 하였다. 또한, Seeley, Umberger와 Shapiro (2008), 그리고 Gundersen, Valle, Barr, Danoff, Stanhope 및 Snyder-Mackler (1989)은 건강한 신체를 보유한 안정성이 높은 주자들은 신체 좌-우 움직임의 대칭성이 좋게 나타난다고 주장하였다. 이 외에도 비대칭적으로 반복된 움직임에 의해 인체에 가해진 충격력은 연골 조직의 파열, 퇴행성 골다공증 유발, 세로 파괴와 같이 생리학적 문제점 등이 동반되는 위험성을 갖는다는 다수의 연구가 진행되었다(Gillespie & Dickey, 2003; Rubin, Turner, Muller, Mittra & McLeod, 2002; Ryu, 2010). 이렇듯, 달리기와 같이 동적인 상황에서 개인의 특성으로 발휘되어 나타날 수 있는 위험과 대처 방법을 연구하는 것은 건강한 삶을 지속할 수 있도록 안전 장치를 마련하는 것과 같다.

한편, 달리기 패턴의 안정성, 일관성, 주자의 고유 리듬을 분석하는 방법으로 움직임의 Variability가 있다. Ryu (2014)는 움직임 분석에서 손쉽게 접근 가능하며 이해가 용이한 분석 방법으로 평균과 표준편차를 활용한 변이계수(Coefficient of variation, CV)와 시간 흐름에 대한 연속성을 모두 고려하지만 비선형적 특성을 이해해야 하는 리아프노프 지수(Lyapunov exponent, LyE)가 있다고 소개하였다. 그 중 CV는 스포츠 및 임상을 연구하는 다양한 분야에서 널리 사용된 방법으로서 연속적으로 수집된 시점의 순간, 혹은 범위의 정량적 변화가 얼마나 일관성을 갖는지를 판단한 방법이다(Guimaraes & Isaacs, 1980; Goldberger, Rigney, Mietus, Antman & Greenwald, 1988; Hausdorff et al., 1994; Heiderscheit et al., 2002; Ryu, 2006; Ryu, 2009; Wurdeman, Huben & Stergiou, 2012). 특히, CV는 적은 자료를 이용해 특정 조건 간의 차이점을 판단하거나, 몇몇 스트라이드를 분리하고 시간 표준화하여 스트라이드 전체를 관찰하는 등, 운동 메커니즘을 이해하기 위해 광범위하게 사용되었다. 그러나 시간 연속성을 차단하고 대상자 내-간 비교를 위해 표준화 작업을 적용하는 과정에서 그 측정의 순수성이 왜곡되고 처리 방법에 대한 모호성이 제기되었다(Bauby & Kuo, 2000; Donelan, Shipman, Kram & Kuo, 2004). 반면, LyE는 CV와 달리 데이터를 늘리거나 정제하지

않고 연속된 흐름에서 점차 증가된 무질서의 정도를 나타내는 엔트로피(Entropy)를 확인함으로써, 공간 내 국소적 부분에서 일그러지거나 다른 경로로 이동된 흐름을 정량화 하는 요인으로 사용되었다. 특히, 보행분석 영역에서 LyE는 달리기 주자 본인의 고유 특성과 제어력을 정량적으로 분석하는데 효과적이라고 여겨진다(McAndrew, 2010). Winter (1983) 및 Ryu (2007)는 개별적인 계의 수준과 감각이 각기 다른 상황에서 강제로 통제된 속도는 본인이 동일 궤도로 지속해서 유지하려는 적응력에 동요될 수밖에 없기 때문에, 독립적인 척도로 쉽게 고려되어서는 안되며 LyE 비선형 기법을 통한 국부적 안정성의 정량적 관찰도 반드시 고려되어야 한다고 보고하였다.

이와 같이, 달리기의 동적 안정성을 분석하기 위해서는 속도가 미치는 정량적인 효과와 함께 개인 및 그룹, 실험 조건 등이 어떤 국소적 부분에서 동요를 일으키는지 그 차이를 정량적/정성적으로 판단할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 그 동안 임상적 측면에서 피험자의 개인화 특성을 분석하는데 활용되었던 LyE와 CV를 기준으로 건강한 성인을 대상으로 한 속도가 제한된 달리기에서 나타나는 특이성과 차이점에 대해 살펴보고, 보편적인 달리기 분석에서 고려되어야 할 명확한 변인의 기준을 얻고자 하였다.

METHOD

1. 연구대상자

본 연구에 참여한 연구대상자는 최근 6개월 이내에 근골격계 질환 또는 수술경험이 없는 건강한 20~30대의 성인 남성 14명을 대상으로 선정하였다(나이: 24.7 ± 6.4 yrs, 신장: 176.9 ± 4.6 cm, 몸무게: 74.7 ± 10.9 kg). 이때, 연구참여자가 보유한 경력 중 트레드밀 위에서 3.3 m/s 이상의 속도로 5분 이상 주행한 경험이 1회 이상인 대상자를 기준으로 하였다. 모든 연구 참여자들은 실험에 대한 설명을 자세히 듣고 동의서에 서명을 한 후 실험에 참여하였다.

2. 실험절차

본 연구에서는 달리기 속도에 따른 안정성 차이를 확인하기 위하여 1 m/s 단위로 속도 조절이 가능한 지면반력기 삽입형 트레드밀(Instrumented Treadmill, Bertec, USA) 위에서 세 가지의 속도 조건(2.2 m/s, 2.7 m/s, 3.3 m/s)을 기준으로 러닝을 실시하였다(Figure 1). 이때, 모든 피험자는 좌-우 측 하지의 각 관절 및 분절 피부에 12 mm 크기의 구 형태인 반사마커 27개(Foot: 10개, Shank: 6개, Thigh: 6개, Pelvic: 5개)를 부착하였으며, 3차원 적외선 카메라인 Oqus 8대(Qualiyis,

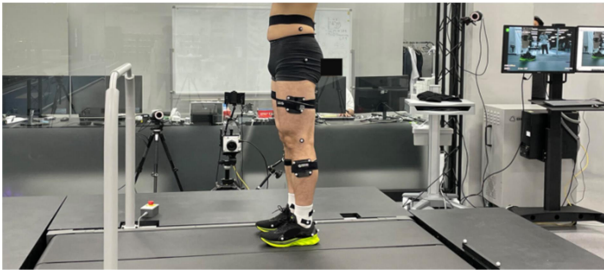


Figure 1. Marker set placed on the lower extremities during running on the instrumented treadmill.

Sweden)를 이용하여 100 Hz 촬영 속도로 마커의 위치를 추적하였다. 속도 간 차이를 분석하기 위해 고관절 및 우측 하지의 위치 좌표만을 사용하였다. 반사마커 위치 추적에 의한 벡터 처리는 Qualisys Track Manager (QTM) 소프트웨어 및 Running PAF 플러그인을 통해 실시하였다. 실험 순서는 대상자의 안전을 위한 각 속도 적응러닝 1분을 실시하고, 5분 간의 본 러닝을 실시하는 순서로 진행하였다. 이때 분석 구간은 5분 간의 러닝 중 중간지점인 2분 30초로부터 1분 간으로 설정하였으며, 그 중 모든 연구참여자의 35 스트라이드를 동일하게 분석하였다. 피로도에 의한 영향을 최소화하기 위해서 각 속도 측정 간 휴식 시간은 15분으로 설정하였다.

3. 자료처리 및 분석변인

3차원 적외선 카메라를 통해 수집된 원자료는 QTM 소프트웨어를 사용하여 전 처리 작업 후 Visual3D (C-motion, USA)로 이관하여 Kinematic 변인 계산을 진행하였다. 이때, LyE 분석을 위한 데이터 처리는 필터링 되지 않은 원자료 벡터 및 Kinematic 결과물로 진행하였으며, CV 분석을 위한 자료처리는 Butterworth 2nd order low-pass filter (cut-off: 6 Hz)를 적용하여 Kinematic 결과를 도출 후 처리하였다. 최종 CV 계산 및 LyE 변인 계산은 Visual3D에서 추출된 Kinematic 결과를 바탕으로 Matlab 2022b 버전(Mathworks, USA)으로 이전하여 계산 처리하였다. 분석 구간은 LyE의 분석의 경우 35 스트라이드의 1 frame부터 마지막 frame까지로 연결된 단일 파라미터 결과를 바탕으로 하여 전체자료를 하나의 완성형 구간으로 설정하였으며, CV의 경우 발 뒤꿈치가 닿는 시점으로부터 그 다음 발 뒤꿈치가 닿는 순간의 1 stride를 기준으로, 변화한 가동 범위(Range of motion, ROM)에 대한 35 스트라이드의 CV를 계산하였다. 이때 사용된 주요 Kinematic 변인은, 발목각도(굴곡-신전, 내번-외번), 무릎각도(굴곡-신전), 엉덩관절 각도(굴곡-신전, 내전-외전, 내측회전-외측회전), 무게중심의 위치변화(전-후, 좌-우, 상-하)로 선정하였다.

다음은 각 대상자들의 kinematic 결과에 대해 LyE 및 CV를 적용한 방법이다.

1) LyE 값

LyE 지수를 사용한 계산 처리 방법은 상태 공간에서 인접한 궤도들의 발산 평균 지수율을 정량화 한 값으로서 variability를 분석하는 비선형 기법 중 가장 강력한 기법 중 하나이다 (Stergiou, Jensen & Bates, 2001; Ryu, 2009). 본 연구에서는 Ryu (2009)가 적용한 4단계의 처리 방법과 동일하게 수행하였으며 다음과 같다.

$$X(t) = [x(t), x(t+T), x(t+2T), \dots, x(t+(d-1)T)] \dots \quad (1)$$

여기서 $X(t) = d$ 차원 상태 벡터, $x(t)$ = 원래 1차원 자료, T = 시간지연, d = 끼워 넣기 차원이며, 본 연구에서는 시간 지연 7, 끼워 넣기 차원 5로 설정하였다. 이와 같이 구축된 상태 공간에서 두 점 사이의 거리가 지수 함수적으로 변화한다는 가정하에 계 내의 최대 LyE는 다음 (2-4)의 순서대로 산출하였다.

$$d(t) = d_0 e^{\lambda_1 t} \quad (2)$$

여기서 $d(t)$ 는 시간 t 에서 상태 공간 내 인접하는 궤도 사이에 평균 변위이고, d_0 는 최초 인접한 점들 사이의 간격이다. 위 공식에서 양변에 로그를 취하면 LyE (λ^*)는 다음과 같이 정의된다.

$$\ln[d_j(i)] \approx \lambda^* (i\Delta t) + \ln[d_{0j}] \quad (3)$$

여기서 $d_j(i)$ 는 i 이산 시간 간격 이후 가장 인접한 j 번째 쌍 사이의 거리를 나타낸다. 상태 공간에서 인접한 궤도들 사이에 유클리드 거리는 시간 함수로 계산되었고 가장 인접한 모든 원래 쌍들에 대해 평균했다. λ^* 지수들은 곡선에 맞춘 선형의 기울기로부터 추정되었다.

$$y(i) = \frac{1}{\Delta t} \langle \ln[d_j(i)] \rangle \quad (4)$$

여기서 $\langle \cdot \rangle$ 는 j 의 모든 값에 대해 평균을 나타낸 것이다.

2) CV 값

선형 기법의 변동성을 분석하기 위한 산출 방법으로 다음

과 같이 변이계수를 측정하였다.

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum(x - \frac{\sum x}{n})^2}{n-1}}}{\frac{\sum x}{n}} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5)$$

여기서 σ 는 표준편차, μ 는 평균을 의미한다.

4. 통계처리

본 연구에서는 세 가지의 달리기 속도 조건에서 대상자들

의 kinematic 결과에 대한 변동성을 비교하고자, CV 및 LyE의 결과를 SPSS 20.0 (IBM, USA)을 사용하여 각 변인에 대한 기술통계분석과 반복측정 일원변량 분산분석(One-way ANOVA for repeated measure)을 실시하였다. Post-hoc 분석은 LSD, 유의 수준은 $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

RESULTS

1. LyE 값

세 가지의 달리기 속도에서 변화한 피험자의 비선형 LyE 값

Table 1. One-Way repeated measures ANOVA for LyE of kinematic results according to velocity

Variables	2.2 m/s ^a	2.7 m/s ^b	3.3 m/s ^c	Fvalue	p value	Post-hoc	η^2
Ankle (Dor/Plant)	1.909±1.423	1.403±0.469	1.520±0.743	1.260	0.295		0.880
Ankle (Inv/Ev)	1.931±1.19	2.327±1.289	1.980±1.739	0.363	0.699		0.027
Knee (Flex/Ext)	0.826±0.366	0.721±0.291	0.620±0.247	7.700	0.002*	a > c	0.372
Hip (Flex/Ext)	1.172±1.104	1.367±0.690	1.279±0.632	0.250	0.702		0.019
Hip (Ab/Ad)	0.289±0.241	0.621±0.702	0.763±0.703	5.595	0.010*	a < b, a < c	0.301
Hip (IntR/ExtR)	1.431±0.606	1.414±0.843	1.315±0.697	0.226	0.799		0.017
COMx	0.010±0.002	0.010±0.002	0.012±0.002	3.837	0.035*	a < c, b < c	0.228
COMy	0.005±0.002	0.004±0.001	0.004±0.001	6.986	0.004*	a > b, a > c	0.350
COMz	0.013±0.002	0.014±0.003	0.014±0.002	3.083	0.063*	a < c	0.192

Dor: dorsiflexion; Plant: plantar flexion; Inv: inversion; Ev: eversion; Flex: flexion; Ext: extension; Ab: abduction; Ad: adduction; IntR: internal rotation; ExtRL: external rotation; COM: center of mass; x: coronal axis direction; y: sagittal axis direction; z: transverse axis direction

*: Indicates statistical significance at the .05 level

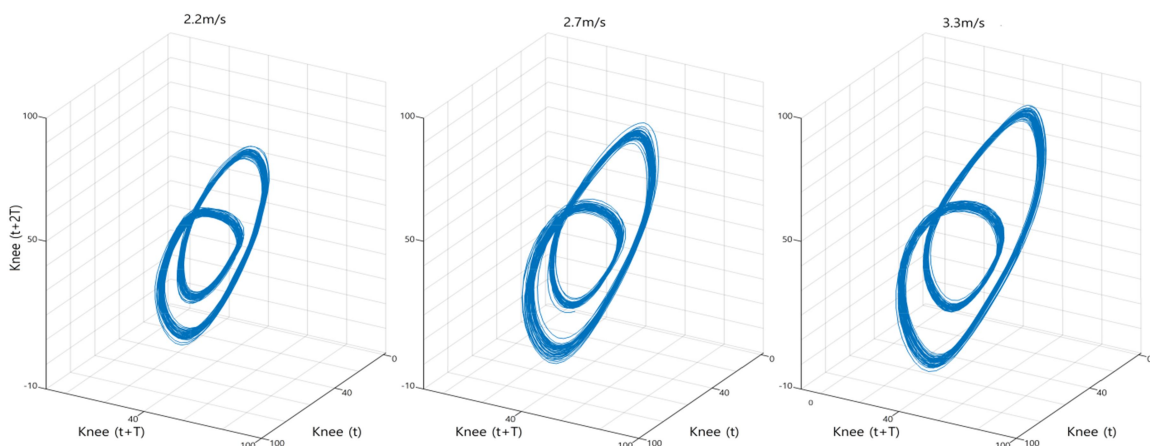


Figure 2. 3D view of n-dimensional time delay for entropy verification of knee angle (Flex/Ext) with increasing velocity.

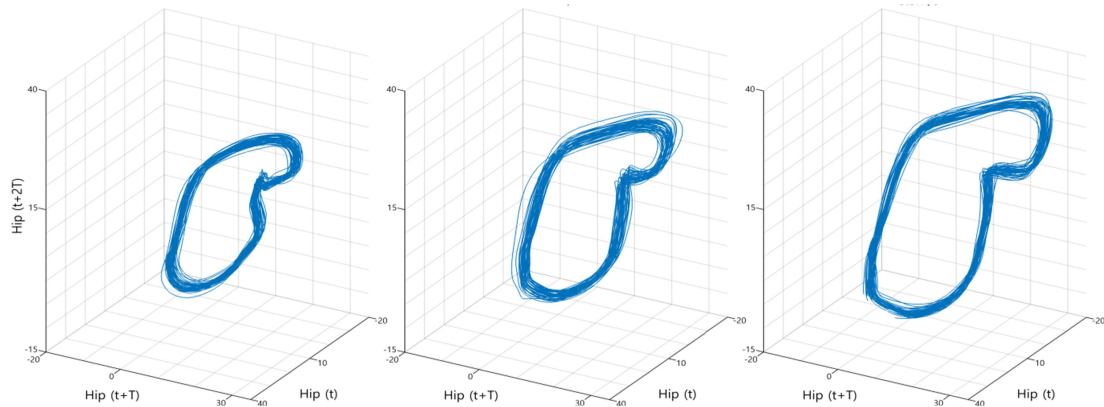


Figure 3. 3D view of n-dimensional time delay for entropy verification of hip angle (Ab/Ad) with increasing velocity.

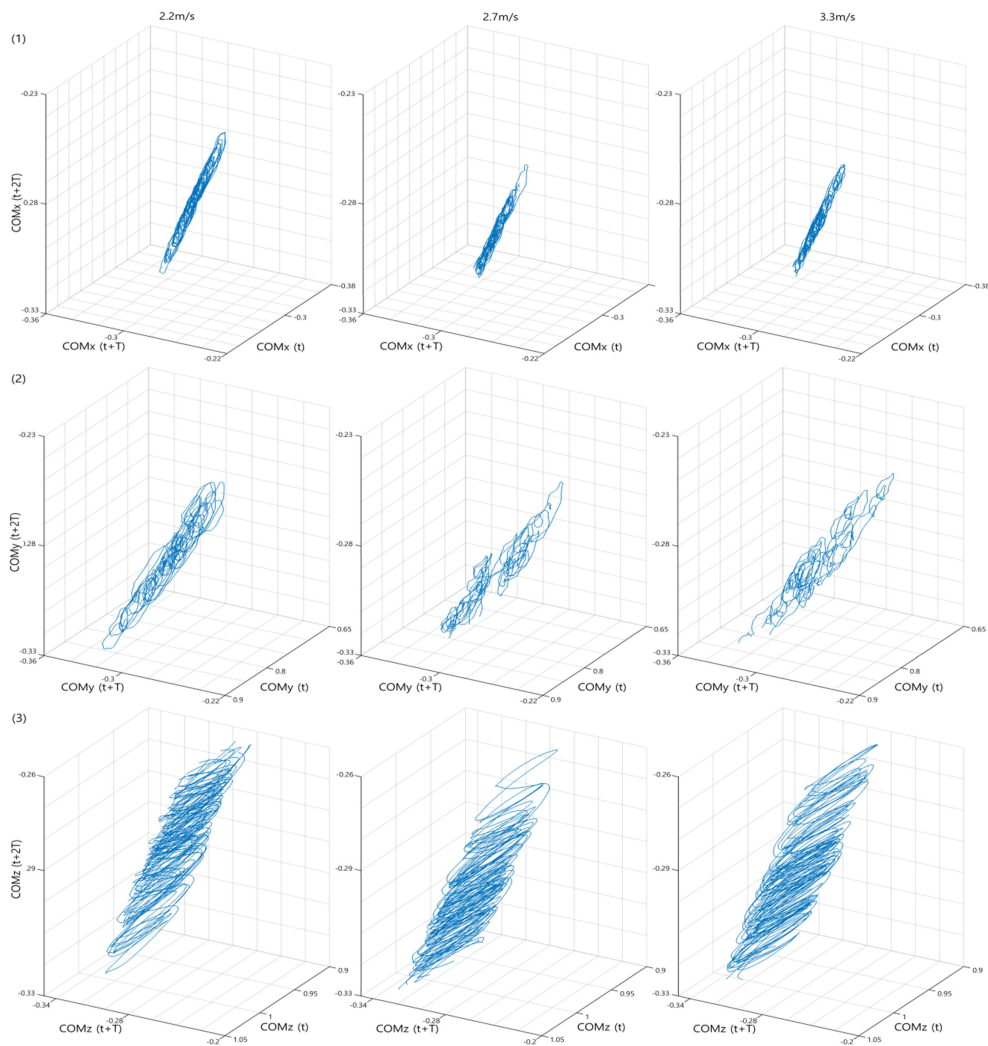


Figure 4. 3D view of n-dimensional time delay for entropy verification of three directions (1: coronal axis; 2: sagittal axis; 3: transverse axis) of COM with increasing velocity.

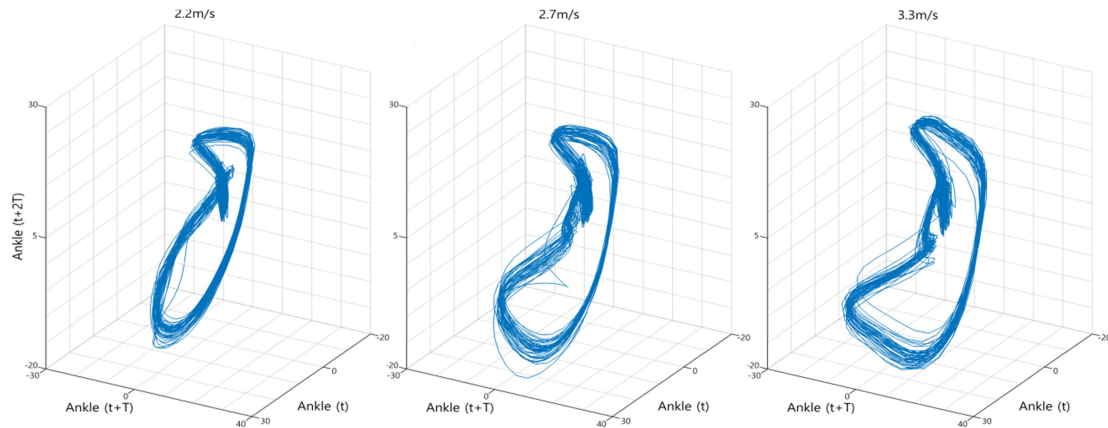


Figure 5. 3D view of n-dimensional time delay for entropy verification of ankle angle (Flex/Ext) with increasing velocity.

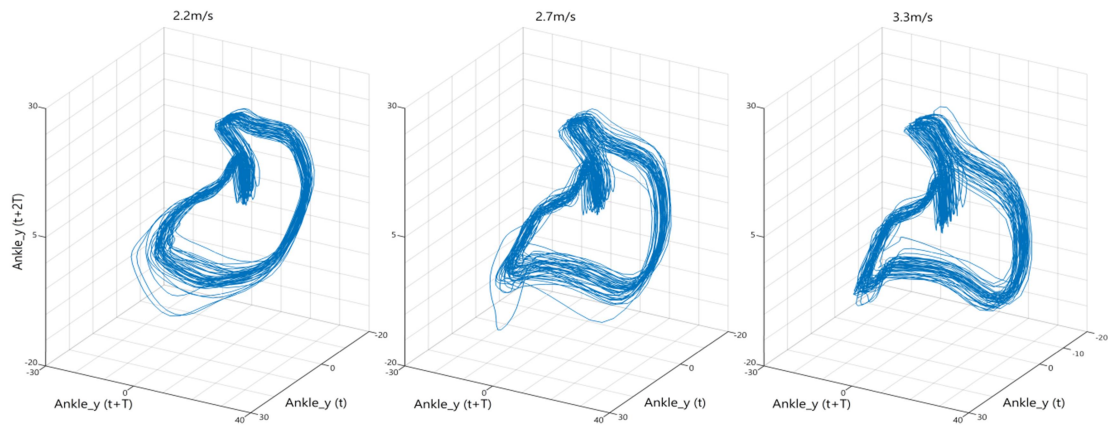


Figure 6. 3D view of n-dimensional time delay for entropy verification of ankle angle (Inv/Ev) with increasing velocity.

과 이들의 통계적 검증은 <Table 1>과 같다. 결과에 의하면 속도 차이에 따른 변동성이 유의하게 발생하는 부위는 무릎의 굴곡-신전(Figure 2), 엉덩관절의 내전-외전(Figure 3), 신체 중심 위치변화 세 방향 모두(Figure 4)에서 불규칙한 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 통계적 유의성에서 차이가 높게 나타난 무릎의 굴곡-신전 및 신체중심의 전-후 움직임에서는 속도가 최대로 증가했을 때 가변성이 오히려 작아지는 경향이 있는 것으로 나타났다. 반면, 발목의 굴곡-신전(Figure 5) 및 내번-외번(Figure 6)은 속도 증가에 따른 유의미한 변동성이 나타나지 않았다.

2. CV 값

세 가지의 달리기 속도에서 각 변인의 최소-최대 ROM을 검증한 CV 값은 <Table 2>와 같다. 결과에 의하면 속도 차이

에 따른 변동성이 유의하게 발생하는 부위는 발목의 굴곡-신전, 발목의 내번-외번, 무릎의 굴곡-신전, 엉덩관절의 내측회전-외측회전, 신체중심의 좌-우 움직임이었다. 특히, 발목의 움직임은 LyE 결과에서 유의미하게 나타나지 않았던 변인으로서, 저속주행(2.2 m/s)과 그 이상의 속도 간에 개별적으로 차이를 보였으며, 속도가 빨라질수록 변동성이 작아지는 추세를 보였다. 반면, 신체중심의 좌-우 움직임 범위는 속도가 빨라질수록 변동성이 커졌으며 통계적으로 가장 높은 차이점이 나타났다($p < .001$).

DISCUSSION

최근 달리기 인구의 폭발적인 증가와 함께 다양한 부상들이 초래되는 사례가 늘고 있다(Tsuji, Ishida, Oba, Ueki & Fujihashi, 2015). 그 중 속도변화에 따른 영향은 오래 전부터

Table 2. One-Way repeated measures ANOVA for CV of kinematic results according to velocity

Variables	2.2 m/s ^a	2.7 m/s ^b	3.3 m/s ^c	F value	p value	Post-hoc	η^2
Ankle (Dor/Plant)	0.06±0.021	0.05±0.019	0.051±0.014	3.979	0.031*	a > b, a > c	0.234
Ankle (Inv/Ev)	0.151±0.036	0.135±0.036	0.129±0.025	4.132	0.027*	a > b, a > c	0.228
Knee (Flex/Ext)	0.037±0.009	0.036±0.013	0.034±0.01	0.386	0.683		0.029
Hip (Flex/Ext)	0.046±0.011	0.04±0.008	0.037±0.009	5.184	0.013*	a > c	0.285
Hip (Ab/Ad)	0.113±0.058	0.108±0.038	0.108±0.046	0.536	0.591		0.040
Hip (IntR/ExtR)	0.155±0.04	0.147±0.035	0.136±0.041	3.099	0.062	a > c	0.193
COMx	0.34±0.052	0.374±0.076	0.44±0.088	13.917	0.000**	a < c, b < c	0.517
COMy	0.459±0.051	0.423±0.075	0.412±0.073	1.982	0.158		0.132
COMz	0.05±0.022	0.044±0.012	0.049±0.018	1.816	0.183		0.123

Dor: dorsiflexion; Plant: plantar flexion; Inv: inversion; Ev: eversion; Flex: flexion; Ext: extension; Ab: abduction; Ad: adduction; IntR: internal rotation; ExtRL: external rotation; COM: center of mass; x: coronal axis direction; y: sagittal axis direction; z: transverse axis direction

*: Indicates statistical significance at the .05 level; **: Indicates statistical significance at the .001 level

주요 요인으로 보고되어 왔다. Cheng, Macera, Davis, Ainsworth, Troped 및 Blair (2000)은 17,000명의 환자를 조사한 결과 상당수가 러닝을 실시하는 사람들로 이루어져 있으며, 특히 주당 20마일 이상을 빠르게 달리는 러너들에게서 부상이 속출하고 골 관절염 발생률이 높다고 보고하였다. 빠른 달리기는 일반적으로 더 큰 지면반력을 발생시키고 신체의 여러 부위가 스트레스를 받는다(Munro, Miller & Fuglevand, 1987; Mercer, Vance, Hreljic & Hamill, 2002). 이와 같은 달리기 부상 부위로는 무릎, 발/발목, 하퇴 부위에서 가장 빈번하게 발생하며, 특히 과 사용으로 인한 주요 부상은 슬개대퇴 통증 증후군, 장경대 마찰 증후군, 족저근막염 등이 있다(Taunton, Ryan, Clement, McKenzie, Lloyd-Smith & Zumbo, 2002). 다양한 속도에서 달리는 동안 인체의 적응 및 상해 예측과 관련한 연구가 다양하게 진행되었는데, 그 중 상당수가 인체의 동적 안정성이 결여되어 문제가 발생한다고 보고한 바 있다(Dingwell & Marin, 2006; England & Granata, 2007; Hamill, Palmer & Emmerik, 2012). 이에 대해 일찍이 보행 및 달리기를 연구한 생체역학 분야에서는 전통적으로 Variability가 안정성과 관련이 있다는 가설을 제시하여 왔다(Holt, Jeng, Ratcliffe & Hamill, 1995; Yack & Berger, 1993; Maki, 1997; Winter, 1983). 그러나 Variability를 측정하는 통계적 방법은 시계열 자료의 시공간 구조를 고려하지 못하고, 이동 운동 시 동요에 대한 이동계의 민감도를 측정하지 못하는 등의 한계가 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 비선형 동역학 기법이 적용되고 있으며 그 중에서도 Lyapunov 지수(Dingwell & Cusumano, 2000; Lyapunov, 1992)는 상태 공간에서 시간에 따라 인접한 궤도들

의 평균 로그(대수) 분산의 기울기를 계산하여 불안정성을 평가하는 척도로 사용되고 있다. 이 Lyapunov의 동적 안정성 구조는 지수 안정성이라는 프레임워크, 즉 일관성을 해석하는 뼈대 구조로도 불리며 작은 섭동(궤도가 크게 손상되지 않는 선에서 영향을 주는 요인 혹은 장애)에 반응하여 보행 패턴의 운동학이 어떻게 변하는지를 정량적으로 도출할 수 있다고 알려져 왔다(Ihlen, van Schooten, Bruijn, Pijnappels & van Dieën, 2017; Lyapunov, 1992). 특히 "국소 부분의 동적 안정성"을 가장 잘 대변하는 것으로 여겨진다. 따라서 달리기 속도 증가에 따른 인체의 안정성 변화를 탐색하는 두 가지 방법에 대해 그 차이를 확인해 보고자 비선형 시계열 분석법인 LyE 분석, 일반적인 시계열 분석법인 CV 분석을 토대로 그 차이점을 살펴본 본 연구는 그 가치가 있다.

우선, CV의 발목 변인 모두에서 속도가 증가할수록 스트라이드 간 가동 범위에서 변화가 나타나는 것을 확인하였다. 특히, 낮은 속도의 달리기와 가장 빠른 속도의 달리기에서 변동이 작아지는 특성이 나타났다. 이러한 결과는 다양하게 연구되어온 보행 분석에서 명확히 언급된 것과 같이, 속도가 빨라질수록 일부 동작의 범위가 축소되고 일관성이 향상된다는 주장과 일맥 상통한다(Brughelli, Cronin & Chaouachi, 2011). 그러나 그 중 일부는 트레드밀 위에서 실시하는 고정된 속도에서 올 수 있는 자율성의 역제가 개인의 능동적인 변화를 억제한다는 점에서 트레드밀에서는 보다 더 작은 변동으로 이어지는 특성을 보인다(Bruijn, Meijer, Beek & van Dieën, 2013; Choi, Kang & Tack, 2008). 반면, LyE는 발목의 변동성에 대해 통계적으로 유의차이가 전혀 나타나지 않았는데, 발목의 내

변-외변에서는 오히려 중간 속도인 2.7 m/s에서 가장 큰 변동이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 그간 보편적으로 언급된 "달리기 속도가 발목의 변동성에 영향을 준다"는 주장(Lee & Kim, 2019, 2021)과는 별개로, 본 실험에서는 피험자들이 속도 증가에 대한 적응력을 발목 부위에서 충분히 구현하고 있다고 판단할 수 있겠다. 특히 발목의 내변-외변의 경우 낮은 속도에서 중간 속도로 증가하였을 때, 평균적으로 변화가 일정량 커진 후, 마지막 최종 속도에서는 안정화된 것으로 나타났다는데, 이 결과는 경우에 따라 발목의 안정화 전략이 기타 무릎 및 다른 변인보다 그 영향력이 낮거나 무시될 수 있음을 시사하는 것이라고 판단된다.

두 번째로, 무릎의 굴곡-신전은 LyE에서만 통계적인 차이를 보였다. 이는 동일한 패턴을 지속해서 유지할 수 있는가에 대한 LyE 분석 특성이, 일정 범위 안에서 동일한 각도를 재현할 수 있는가를 측정하는 단편적 end-to-end의 CV 방식보다 시간 흐름의 연속성에서 매우 탁월하게 탐색 가능함을 의미하는 것(Kantz & Schreiber, 2015)이라고 사료된다. 또한, 무릎이 가진 굴곡-신전 각도의 범위의 한계, 일정한 속도로 자동 유지되는 트레드밀의 특성, 전체 구간 중 최대-최소 각도를 추출하는 공간 범주의 느슨함에 기인한 것으로 판단되며, 이는 시계열 자료의 절단을 이용한 통계의 활용이 부적절함을 시사하는 단편적인 예(Gupta, 2018; Santos-Lozano, Collado, Foster, Lucia & Garatachea, 2020; Zhang, Zhang, Huang, Li & Gong, 2016)라고 판단된다.

세 번째로, 엉덩관절의 움직임에서는 두 가지 방법 간에 상이한 결과가 도출되었다. CV는 속도가 증가할수록 엉덩관절의 굴곡-신전, 내측회전-외측회전의 변화가 작아지는 값을 보였지만, 반면 LyE 방법은 속도가 증가할수록 엉덩관절의 내전-외전에서만 변동량이 증가하여 불안정성이 높아지는 것으로 나타났다. 일반적으로 속도변화에 따라 인체의 안정화에 영향을 주는 요인이 엉덩관절의 굴곡-신전(Tominaga, Ishii, Ueda & Kurokawa, 2016; Tojima, Osada & Torii, 2019), 내측회전-외측회전(Cannon, Finn & Yan, 2018), 그리고 내전-외전(Foch, Brindle & Milner, 2020; Liu, Lewton, Colletti & Powers, 2021) 모두에서 각기 영향을 준다는 다양한 사례들이 있었다. 이는 접근 방식에서 차이가 존재하지만, 달리기 속도 연구에서 인체의 안정화와 관련된 요인 중 엉덩관절이 상당부분 역할을 한다는 연구들과 통합된다고 볼 수 있겠다(Van Oeveren, de Ruiter, Beek & van Dieën, 2021; Dorn, Schache & Pandey, 2012; Noehren, Schmitz, Hempel, Westlake & Black, 2014; Schache et al., 2011). 그럼에도 LyE의 경우 CV와는 반대의 경향으로 값이 커진 것을 살펴볼 때, CV의 경우 속도가 빨라지면서 인체의 동작범위 축소를 활용한 힘의 전달을 용이하게 하는 점을 탐색하는 것으로 보이며(Brughelli et al., 2011), LyE는 힘의 여파에 따라 좌-우 움직임의 변동이 커지면서 이를

제어하기 위한 개인의 메커니즘이 궤적 패턴상에서 발휘 중인 것을 탐지하는 예측변수로 고려될 수 있다고 판단된다.

마지막으로, 인체 안정성에 대한 결과를 가장 잘 대변한다고 알려진 COM의 움직임(Arampatzis, Bröggemann & Metzler, 1999; Carpentier, Benallegue & Laumond, 2017; Lee & Farley, 1998; Tesio & Rota, 2019) 변동에서는 LyE가 모든 방향에서 유의한 차이를 보이면서 속도에 의한 영향에 크게 반응하는 것으로 나타났다. 그 중 전-후 움직임은 작아지는 경향을 보였으며 좌-우, 상-하 변동성은 커지는 특성을 보였다. 반면 CV는 좌-우 방향에서만 변동 범위가 커진 것으로 나타났다. 이와 같은 사실을 종합해 보면, 달리기 속도 증가에 영향을 받는 모든 요인들 중에서 신체중심의 좌-우 움직임이 가장 크다는 것을 의미한다고 볼 수 있겠다. 이는 속도가 증가할수록 GRF 값이 커지고 고관절의 내-외전 모멘트가 커진다는 역동역학적 근거(Dorn et al., 2012; Schache et al., 2012)에 기반하여, 신체중심의 좌-우 최대 이동 범위 및 동일 궤적에서 벗어나려는 무질서 양상이 모두 증가하여 중요한 변수로 고려되어야 한다는 점을 시사한다고 판단할 수 있다(Buehler, Koller, De Comtes & Kainz, 2021; Dorn et al., 2012; Orendurff et al., 2018; Tojima et al., 2019; Wada, Tateuchi, & Ichihashi, 2014). 다만, 다양한 연구들이 언급한 속도가 증가할수록 좌-우 움직임이 작아진다는 일부 결과와 비교하였을 때, 정 반대되는 결과로 인식될 수 있는 위험성이 존재하는데, 이는 속도가 증가할수록 각도 및 위치변화 그 자체 값이 작아진다는 선행연구들(Jin, 2018; Lee & Guo, 2010; Tominaga et al., 2016)과 달리 본 연구에서는 동일한 패턴으로 지속이 되는가에 대한 물음, 즉, 연속성을 지키는 안정화와 관련 있기 때문에 해석의 주의가 필요할 것으로 사료된다.

위 결과를 종합하면, 달리기 속도가 증가할수록 인체는 다양한 요인에서 그 변화를 안정시키며, 지속하려는 노력을 한다. 이때 자칫 안정화 시도가 부족하였거나 다른 외부 요인에 의해 그 기능이 현저하게 떨어질 경우 낙상 및 상해가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 인체 안정성에 대해 속도가 미치는 영향을 알아보고 두 가지 각기 다른 분석법을 통해 얻을 수 있는 범용적 관점을 찾고자 하였다. 결과적으로 속도가 주는 영향에 대해 두 가지 방법에서 모두 유의한 차이점들이 나타났으며, CV는 기존 연구와 유사한 결과를 보이며 속도가 인체 가동 범위에 영향을 준다는 점을 재확인시켜 주었다. 반면 LyE는 속도에 적응하려는 개인의 변화량이 수집된 것으로 보였다. 이를 통해 도출 가능한 주요 사실은, 1) 신체중심의 좌-우 움직임이 안전성 변인으로 상시 고려되어야 한다는 점, 2) 속도가 증가하더라도 개인의 발목 변동성이 크게 교란되지 않는다는 점이다. 그 외 통합할 수 없는 비 표준화된 통계 데이터를 직접 비교함으로써 해석의 방향이 각각의 분야에서 다르게 받아들여 질 수 있는 점에서 해

석의 주의를 필요하다.

CONCLUSION

본 연구에서는 달리기 속도 증가가 인체의 안정화에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 이를 위해 속도 간 운동학 결과에 대한 변이계수(Coefficient of variance) 및 리아프노프 지수(Lyapunov exponent)로 비교하였다. 연구 결과를 토대로, 달리기 속도의 변화는 인체가 일관성을 유지하려는 안정화 전략에 상당부분 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 신체중심의 좌-우 움직임은 가장 크게 영향을 받는 공통 요인으로서 속도 안정화 연구에서 중요한 매개변수로 고려되어야 함이 밝혀졌다. 또한, 인체가 가진 발목관절의 적응 기전은 다양한 속도의 변화에도 그 기능이 충분히 발휘될 수 있다는 새로운 관점이 도출되었다. 이와 같이, 달리기 속도에 대한 영향을 평가할 때, 다양한 관점에서 인체의 기능이 평가될 필요가 있으며, 특히 비선형 시계열 분석법을 적극적으로 도입하여 소실될 수 있는 인체의 순수 기능을 자세히 살펴봐야 하겠다.

REFERENCES

- Arampatzis, A., Brüggemann, G. P. & Metzler, V. (1999). The effect of speed on leg stiffness and joint kinetics in human running. *Journal of Biomechanics*, *32*(12), 1349-1353.
- Bauby, C. E. & Kuo, A. D. (2000). Active control of lateral balance in human walking. *Journal of Biomechanics*, *33*(11), 1433-1440.
- Brughelli, M., Cronin, J. & Chaouachi, A. (2011). Effects of running velocity on running kinetics and kinematics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *25*(4), 933-939.
- Bruijn, S. M., Meijer, O. G., Beek, P. J. & van Dieën, J. H. (2013). Self-paced versus fixed speed treadmill walking. *Gait & Posture*, *37*(2), 313-317.
- Buehler, C., Koller, W., De Comtes, F. & Kainz, H. (2021). Quantifying muscle forces and joint loading during hip exercises performed with and without an elastic resistance band. *Frontiers in Sports and Active Living*, *223*.
- Cannon, A., Finn, K. & Yan, Z. (2018). Comparison of hip internal and external rotation between intercollegiate distance runners and non-running college students. *International Journal of Sports Physical Therapy*, *13*(6), 956.
- Cappellini, G., Ivanenko, Y. P., Poppele, R. E. & Lacquaniti, F. (2006). Motor patterns in human walking and running. *Journal of Neurophysiology*, *95*(6), 3426-3437.
- Carpentier, J., Benallegue, M. & Laumond, J. P. (2017). On the centre of mass motion in human walking. *International Journal of Automation and Computing*, *14*, 542-551.
- Cheng, Y., Macera, C. A., Davis, D. R., Ainsworth, B. E., Troped, P. J. & Blair, S. N. (2000). Physical activity and self-reported, physician-diagnosed osteoarthritis: Is physical activity a risk factor? *Journal of Clinical Epidemiology*, *53*, 315-322.
- Choi, J. S., Kang, D. W. & Tack, G. R. (2008). Effects of walking speeds and cognitive task on gait variability. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *18*(2), 49-58.
- Dickey, J. P. & Gillespie, K. A. (2003). Determination of the effectiveness of materials in attenuating high frequency shock during gait using filterbank analysis. *Clinical Biomechanics*, *18*(1), 50-59.
- Dingwell, J. B. & Cusumano, J. P. (2000). Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, *10*(4), 848-863.
- Dingwell, J. B. & Marin, L. C. (2006). Kinematic variability and local dynamic stability of upper body motions when walking at different speeds. *Journal of Biomechanics*, *39*(3), 444-452.
- Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Sternad, D. & Cavanagh, P. R. (2000). Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous overground walking. *Journal of Biomechanics*, *33*(3), 343-350.
- Donelan, J. M., Shipman, D. W., Kram, R. & Kuo, A. D. (2004). Mechanical and metabolic requirements for active lateral stabilization in human walking. *Journal of Biomechanics*, *37*(6), 827-835.
- Dom, T. W., Schache, A. G. & Pandey, M. G. (2012). Muscular strategy shift in human running: Dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *Journal of Experimental Biology*, *215*(11), 1944-1956.
- England, S. A. & Granata, K. P. (2007). The influence of gait speed on local dynamic stability of walking. *Gait & Posture*, *25*(2), 172-178.
- Foch, E., Brindle, R. A. & Milner, C. E. (2020). Weak associations between hip adduction angle and hip abductor muscle activity during running. *Journal of Biomechanics*, *110*, 109965.
- Forman, D. E., Hausdorff, J. M., Ladin, Z., Goldberger, A. L., Rigney, D. R. & Wei, J. Y. (1994). Increased walking vari-

- ability in elderly persons with congestive heart failure. *Journal of the American Geriatrics Society*, 42(10), 1056-1061.
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R., Mietus, J., Antman, E. M. & Greenwald, S. (1988). Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: Heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia*, 44, 983-987.
- Guimaraes, R. M. & Isaacs, B. (1980). Characteristics of the gait in old people who fall. *International Rehabilitation Medicine*, 2(4), 177-180.
- Gundersen, L. A., Valle, D. R., Barr, A. E., Danoff, J. V., Stanhope, S. J. & Snyder-Mackler, L. (1989). Bilateral analysis of the knee and ankle during gait: an examination of the relationship between lateral dominance and symmetry. *Physical Therapy*, 69(8), 640-650.
- Gupta, A. (2018). Running analysis. *International Journal of Physiotherapy and Research*, 6(3), 2751-2756.
- Hamill, J., Palmer, C. & Van Emmerik, R. E. (2012). Coordinative variability and overuse injury. *Sports Medicine*, 42(10), 851-865.
- Hausdorff, J. M., Forman, D. E., Ladin, Z., Goldberger, A. L., Rigney, D. R. & Wei, J. Y. (1994). Increased walking variability in elderly persons with congestive heart failure. *Journal of the American Geriatrics Society*, 42(10), 1056-1061.
- Heiderscheit, B. C., Hamill, J. & van Emmerik, R. E. (2002). Variability of stride characteristics and joint coordination among individuals with unilateral patellofemoral pain. *Journal of Applied Biomechanics*, 18(2), 110-121.
- Holt, K. G., Jeng, S. F., Ratcliffe, R. & Hamill, J. (1995). Energetic cost and stability during human walking at the preferred stride frequency. *Journal of Motor Behavior*, 27(2), 164-178.
- Ihlen, E. A., van Schooten, K. S., Bruijn, S. M., Pijnappels, M. & van Dieen, J. H. (2017). Fractional stability of trunk acceleration dynamics of daily-life walking: Toward a unified concept of gait stability. *Frontiers in Physiology*, 8, 516.
- Jin, L. (2018). *Kinematic and kinetic analysis of walking and running across speeds and transitions between locomotion states* (Doctoral dissertation). University of Oregon.
- Kantz, H. & Schreiber, T. (2015). Nonlinear time-series analysis revisited. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 25(9), 097610.
- Lee, C. R. & Farley, C. T. (1998). Determinants of the center of mass trajectory in human walking and running. *The Journal of Experimental Biology*, 201(21), 2935-2944.
- Lee, K. M. & Guo, J. (2010). Kinematic and dynamic analysis of an anatomically based knee joint. *Journal of Biomechanics*, 43(7), 1231-1236.
- Lee, S. & Kim, J. (2019). Ankle angle variability during running in athletes with chronic ankle instability and copers. *Gait & Posture*, 68, 329-334.
- Lee, S. & Kim, J. (2021). Running speed does not influence the asymmetry of kinematic variables of the lower limb joints in novice runners. *Journal of Sports Sciences*, 1-9.
- Liu, J., Lewton, K. L., Colletti, P. M. & Powers, C. M. (2021). Hip adduction during running: Influence of sex, hip abductor strength and activation, and pelvis and femur morphology. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 53(11), 2346-2353.
- Lyapunov, A. M. (1992). The general problem of the stability of motion. *International Journal of Control*, 53(3), 531-534.
- Maki, B. E. (1997). Gait changes in older adults: predictors of falls or indicators of fear? *Journal of the American Geriatrics Society*, 45(3), 313-320.
- McAndrew, P. M., Dingwell, J. B. & Wilken, J. M. (2010). Walking variability during continuous pseudo-random oscillations of the support surface and visual field. *Journal of Biomechanics*, 43(8), 1470-1475.
- Mehdizadeh, S., Arshi, A. R. & Davids, K. (2014). Effect of speed on local dynamic stability of locomotion under different task constraints in running. *European Journal of Sport Science*, 14(8), 791-798.
- Mercer, J. A., Vance, J., Hreljac, A. & Hamill, J. (2002). Relationship between shock attenuation and stride length during running at different velocities. *European Journal of Applied Physiology*, 87, 403-408.
- Munro, C. F., Miller, D. I. & Fuglevand, A. J. (1987). Ground reaction forces in running: A reexamination. *Journal of Biomechanics*, 20, 147-155.
- Murley, G. S., Landorf, K. B., Menz, H. B. & Bird, A. R. (2009). Effect of foot posture, foot orthoses and footwear on lower limb muscle activity during walking and running: a systematic review. *Gait & Posture*, 29(2), 172-187.
- Noehren, B., Schmitz, A., Hempel, R., Westlake, C. & Black, W. (2014). Assessment of strength, flexibility, and running mechanics in men with iliotibial band syndrome. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 44(3), 217-222.
- Orendurff, M. S., Kobayashi, T., Tulchin-Francis, K., Tullock, A. M. H., Villarosa, C., Chan, C., Kraus, E. & Strike, S. (2018). A little bit faster: Lower extremity joint kinematics and

- kinetics as recreational runners achieve faster speeds. *Journal of Biomechanics*, *71*, 167-175.
- Rubin, C., Turner, A. S., Mller, R., Mitra, E., McLeod, K., Lin, W. & Qin, Y. X. (2002). Quantity and quality of trabecular bone in the femur are enhanced by a strongly anabolic, noninvasive mechanical intervention. *Journal of Bone and Mineral Research*, *17*(2), 349-357.
- Ryu, J. S. (2006). Comparisons of frequency domain characteristics of ground reaction forces during walking of young and elderly males. *The Korean Journal of Physical Education*, *4*(5), 457-464.
- Ryu, J. S. (2007). Nonlinear time series analysis of dynamic stability during human walking at the preferred speed. *The Korean Journal of Physical Education*, *4*(2), 431-439.
- Ryu, J. S. (2009). The effect of walking with high-heel shoes on local dynamic stability. *The Korean Journal of Physical Education*, *48*(1), 431-438.
- Ryu, J. S. (2010). Difference of the shoe, dress shoe, and bare-foot's impact factors during walking. *The Korean Journal of Physical Education*, *49*(1), 445-455.
- Ryu, J. S. (2014). Variability of GRF components between increased running times during prolonged run. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *24*(4), 359-365.
- Santos-Lozano, A., Collado, P. S., Foster, C., Lucia, A. & Garatachea, N. (2020). Human running performance from real-world big data. *Nature Communications*, *11*(1), 1-10.
- Sasaki, K. & Neptune, R. R. (2006). Differences in muscle function during walking and running at the same speed. *Journal of Biomechanics*, *39*(11), 2005-2013.
- Schache, A. G., Blanch, P. D., Dom, T. W., Brown, N. A., Rosemond, D. & Pandy, M. G. (2011). Effect of running speed on lower limb joint kinetics. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *43*(7), 1260-1271.
- Schache, A. G., Dom, T. W., Blanch, P. D., Brown, N. A. & Pandy, M. G. (2012). Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *44*(4), 647-658.
- Seeley, M. K., Umberger, B. R. & Shapiro, R. (2008). A test of the functional asymmetry hypothesis in walking. *Gait & Posture*, *28*(1), 24-28.
- Stergiou, N., Jensen, J. L., Bates, B. T., Scholten, S. D. & Tzetzis, G. (2001). A dynamical systems investigation of lower extremity coordination during running over obstacles. *Clinical Biomechanics*, *16*(3), 213-221.
- Taunton, J. E., Ryan, M. B., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Lloyd-Smith, D. R. & Zumbo, B. D. (2002). A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries. *British Journal of Sports Medicine*, *36*(2), 95-101.
- Tesio, L. & Rota, V. (2019). The motion of body center of mass during walking: A review oriented to clinical applications. *Frontiers in Neurology*, *10*, 999.
- Tojima, M., Osada, A. & Torii, S. (2019). Changes in hip and spine movement with increasing running speed. *Journal of Physical Therapy Science*, *31*(8), 661-665.
- Tominaga, R., Ishii, Y., Ueda, T. & Kurokawa, T. (2016). The effects of running speed on ground reaction forces and lower limb kinematics during single-leg stop movement. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *30*(5), 1224-1230.
- Tsuji, K., Ishida, H., Oba, K., Ueki, T. & Fujihashi, Y. (2015). Activity of lower limb muscles during treadmill running at different velocities. *Journal of Physical Therapy Science*, *27*(2), 353-356.
- Van Oeveren, B. T., de Ruyter, C. J., Beek, P. J. & van Dieën, J. H. (2021). The biomechanics of running and running styles: A Synthesis. *Sports Biomechanics*, 1-39.
- Vernillo, G., Martinez, A., Baggaley, M., Khassetarash, A., Giandolini, M., Horvais, N., Edwards, W. B. & Millet, G. Y. (2020). Biomechanics of graded running: Part I—stride parameters, external forces, muscle activations. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *30*(9), 1632-1641.
- Wada, O., Tateuchi, H. & Ichihashi, N. (2014). The correlation between movement of the center of mass and the kinematics of the spine, pelvis, and hip joints during body rotation. *Gait & Posture*, *39*(1), 60-64.
- Winter, D. A. (1983). Biomechanical motor patterns in normal walking. *Journal of Motor Behavior*, *15*(4), 302-330.
- Winter, D. A. (1989). Biomechanics of normal and pathological gait: Implications for understanding human locomotor control. *Journal of Motor Behavior*, *21*(4), 337-355.
- Wurdeman, S. R., Huben, N. B. & Stergiou, N. (2012). Variability of gait is dependent on direction of progression: Implications for active control. *Journal of Biomechanics*, *45*(4), 653-659.
- Yack, H. J. & Berger, R. C. (1993). Dynamic stability in the elderly: Identifying a possible measure. *Journal of Gerontology*, *48*(5), M225-M230.
- Zhang, J., Zhang, J., Huang, K., Li, Y. & Gong, Y. (2016). Human running detection: Benchmark and baseline. *Pattern Recognition*, *60*, 184-198.