Korean Journal of Sport Science 2026, 37(1), 113-122
https://doi.org/10.24985/kjss.2026.37.1.113

Original Article

Biomechanical and Physiological Responses to Different Walking and Running Surfaces: A Repeated-Measures Pilot Study on Cork, Polyurethane, and Concrete

Gukhyeon Kim[1], Kailin Xing[1], Zhu Fang[1], Eulseob An[2], Jaegon Ko[3], and Siddhartha Bikram Panday[4*]

[1]*Department of Physical Education, Hanyang University*
[2]*Department of Sports Rehabilitation, Daelim University*
[3]*Department of Golf Management, Yeoju Institute of Technology*
[4]*Division of Sports Industry and Science, Hanyang University*

Article Info
Received 2025. 12. 31.
Revised 2026. 02. 24.
Accepted 2026. 03. 17.

Correspondence*
Siddhartha Bikram Panday
siddartha@hanyang.ac.kr

Key Words
Surface material, Tibial shock, Cork , Sustainable material, Walking, Running

PURPOSE This pilot study investigated biomechanical and physiological responses during walking and running on three surface materials: concrete, polyurethane, and cork. **METHODS** Four healthy young adult males completed barefoot walking at a speed of 1.4 m/s and running at 2.6 m/s on each surface under a randomized repeated-measures design. Tibial shock was quantified using a wireless inertial measurement unit attached to the distal tibia. Oxygen consumption (VO_2) and heart rate (HR) were measured using a portable metabolic analyzer and a heart rate monitor, respectively. **RESULTS** During walking, tibial shock tended to be lower on the cork surface in most participants. In contrast, no consistent surface-related pattern was observed during running, and substantial interindividual variability was evident. Heart rate remained relatively stable across locomotion conditions, although lower values were generally observed on cork and higher values on concrete surface. Oxygen consumption also exhibited considerable individual variability, with no clear differences detected among the surface conditions. **CONCLUSIONS** Overall, the findings suggest that cork surfaces may provide biomechanical advantages, attenuating impact forces during walking. However, physiological responses, including heart rate and oxygen consumption, appear to be less sensitive to surface materials. In addition, the results support the feasibility of the experimental protocol and provide a methodological foundation for future large-scale studies examining the effects of surface materials on locomotor performance.

서 론

운동이 이루어지는 표면은 보행과 달리기 동안 인체가 경험하는 충격 부하, 에너지 소비, 하지 근골격계의 스트레스에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 요소이다(Kowalsky et al., 2021; Dixon et al., 2000). 표면의 강성이나 감쇠 특성은 착지 순간의 충격 전달 방식과 지면반력의 형태를 결정하며, 이는 편안함, 수행능력, 부상 위험도 등 다양한 측면에 작용한다.

특히 지나치게 단단한 표면은 충격 부하를 증가시키고(Zhuang et al., 2025), 반대로 과도하게 부드러운 표면은 신체의 안정성 확보를 위해 더 많은 근활성도를 요구하여 생리적 부담을 증가시킬 수 있다(Grant et al., 2022). 따라서 표면 조건이 인체 반응에 미치는 영향에 대한 분석은 스포츠과학 및 운동환경 설계에서 필수적으로 고려해야 할 요소이다. 생체역학적으로 볼 때, 표면의 물리적 특성(강성, 감쇠, 탄성)은 지면반력의 크기와 상승률에 영향을 주며, 하지에 전달되는 충격의 변화를 유도한다. 보행 및 달리기 중 착지 시 하지 전체에 전파되는 충격 부하의 민감한 지표로 널리 사용되며(Shao et al., 2023). 반복적으로 발생되는 높은 충격은 피로골절을 비롯한 다양한 과사용 손상의 위험을 증가시키는 것으로 보고되어 왔다(Warden et al., 2021).실제로 표면 강성 차이는 탄성계수에서 뚜렷하게 나타나며,일반적인 콘크리트는 수십 GPa 수준인 반면, 응집 코르크 는 준

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.

정적 압축 시험에서 약 2.5–6 MPa 범위로 보고되며(Jardin et al., 2015) 폴리우레탄(우레탄) 계열 엘라스토머는 5–14 MPa 수준으로 보고되어, 본 연구의 세 표면은 강성(탄성계수)에서 큰 차이를 갖는 조건으로 볼 수 있다(Kanyanta & Ivankovic, 2010). 따라서 적절한 충격 완화 특성을 지닌 바닥재의 선택은 운동 수행자에게 있어 필수적인 안전 요인이다. 경골에 전달되는 충격 부하는 주로 경골 가속도(tibial acceleration)를 통해 평가되며, 이는 경골에 부착된 가속도계를 이용해 장축 방향 최대 가속도를 측정하는 방식으로 산출한다(Sheerin et al., 2019). 경골 충격은 지면반력 기반 부하율과 높은 상관성을 보여(Xiang et al., 2024) 운동 표면이 인체 충격 부하에 미치는 영향을 평가하는 데 신뢰성 높은 지표로 활용된다. 운동 시설에서 흔히 사용되는 콘크리트와 우레탄 기반 바닥재는 일정 수준의 내구성과 기능적 장점을 제공하지만, 생체역학적·환경적 관점에서 여러 문제점을 내포한다. 콘크리트는 생산 과정에서 많은 탄소 배출을 유발하고 도시 열섬 효과를 악화시키는 단점이 있다 (Flower & Sanjayan, 2007; Santamouris, 2013). 우레탄은 기계적 성능은 우수하지만, 고온 환경에서 TVOC(총휘발성유기화합물)를 방출하여 운동 이용자의 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있다(Liu et al., 2020).

이에 따라 충격 완화 기능과 환경적 지속가능성을 동시에 충족하는 새로운 대체 소재에 대한 필요성이 제기되고 있다. 이러한 배경에서 코르크(Cork)는 점탄성 기반 충격 흡수 특성과 재생 가능성, 낮은 열전도율 등 여러 장점을 가진 잠재적 대체재로 주목받고 있다. 코르크는 일정 주기로 무분별한 벌목 없이 재수확이 가능하며(Oliveira & Costa, 2012) 생애 주기 동안 상당량의 이산화탄소를 흡수하는 탄소 포집기능을 가진다(Spampinato, 2018). 또한 다공성 구조를 통해 충격 에너지를 효과적으로 분산시키고 높은 탄성 복원력을 유지한다(Fernandes et al., 2014). 이는 경골 충격과 지면반력 상승률을 감소시키고 하지 관절에 전달되는 기계적 부하를 감소시킬 수 있다. 즉 코르크는 친환경적 소재로서 환경적 부담이 적고 기계적 성능도 우수하다는 점에서 스포츠 및 운동 환경에서 활용 가치가 높을 수 있다. 생리학적 관점에서도, 적절한 감쇠 특성과 탄성을 가진 표면은 충격 완화뿐 아니라 운동 경제성(energy economy) 측면에서 유리할 가능성이 제기된다. 선행연구에 따르면 지면의 기계적 특성(예: 강성)은 보행·달리기 시 대사 비용(metabolic cost)에 영향을 줄 수 있으며, 표면 강성이 감소한 조건에서 달리기 중 대사율이 감소하는 양상이 보고된 바 있다(Kerdok et al., 2002). 그러나 이러한 잠재적 이점에도 불구하고 스포츠과학 분야에서 코르크 바닥의 생체역학 및 생리학적 영향을 정량적으로 조사한 연구는 부족한 실정이다. 기존 연구는 주로 코르크의 물리적 특성(점탄성, 단열성, 감쇠 특성)(Silva et al., 2005; Maderuelo et al., 2014)에 초점을 두었으며, 실제 신체활동이 빈번한 콘크리트·우레탄·코르크 표면을 대상으로 경골 충격과 함께 VO_2 및 HR을 반복측정 방식으로 직접 비교한 연구는 제한적이다. 이러한 연구 공백은 코르크가 실제 운동 환경에서 충격 완화와 생리적 부담 감소에 어떤 역할을 할 수 있는지에 대한 과학적 근거를 제한한다. 이에 본 연구는 코르크 소재 바닥이 보행 및 달리기 수행 중 나타나는 생체역학 및 생리학적 반응에 미치는 영향을 탐색적으로 검증하고자 하였다. 구체적으로 콘크리트, 우레탄, 코르크 표면 간의 경골 충격, VO_2, HR 차이를 비교하고, 향후 대규모 연구 설계를 위한 프로토콜의 실행 가능성과 측정값의 변동성을 평가하는 것을 목적으로 한다. 본 파일럿 연구는 친환경적이며 안전한 운동 시설 구축을 위한 기초적 자료를 제공할 것으로 기대된다.

연구방법

연구대상

본 연구는 근골격계 질환이 없는 건강한 성인 남성 4명을 대상으로 수행되었다. 연구 대상자는 최근 6개월 이내 하지 관련 근골격계 손상이나 신경학적 질환을 진단받은 적이 없으며, 독립적인 보행 및 달리기 수행이 가능한 자로 선정하였다(Rao et al., 2024). 또한 주 2회 이상 규칙적인 유산소 운동 또는 스포츠 활동에 참여하는 자로 최종 선정하였다. 연구 제외 기준은 심혈관 질환 및 호흡기 질환 등 중강도 이상의 신체 활동 수행에 제한이 있는 만성질환을 보유한 경우, 최근 3개월 이내 하지 부상 또는 통증을 경험한 경우, 현재 다른 중재 연구에 참여 중인 경우 제외하였다. 본 연구는 모든 참여자에게 연구의 절차를 설명한 후 진행하였으며, 자발적 참여를 원칙으로 서면 동의를 확보하였다. 연구의 전체 실험 설계 및 측정 절차는 〈Fig. 1〉과 같다. 연구대상자들의 신체적인 특성은 〈Table 1〉과 같다.

실험 도구 및 장비

본 연구에서는 다양한 바닥 재질에 따른 보행 및 달리기 동작 시 나타나는 생체역학 및 생리학적 특성을 측정하기 위해 보행 및 달리기 동안의 경골 가속도를 확인하는 센서로 Noraxon Ultium 3D IMU

Table 1. Characteristic subjects (Mean ± SD)

Variables	Male (n=4)
Age (years)	23.5±1.7
Height (cm)	178±6.5
weight (kg)	79.9±7.7

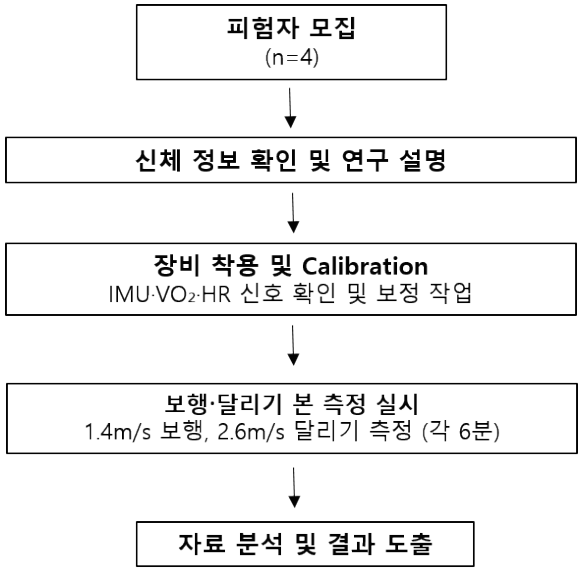

Fig. 1. Experimental procedure

(A)

(B)

Fig. 2. Experimental equipment. (A) Inertial measurement unit (IMU) sensor (B) Portable VO_2 analyzer

(Noraxon, USA) 를 사용하였다. 또한 산소 섭취량 측정을 위한 VO_2 Master(VO_2 Master Health Sensors, Canada) 〈Fig. 2〉와 심박수 측정을 위한 Polar H10(Polar Electro, Finland)를 사용하였다.

경골 충격(tibial shock) 측정은 무선 관성 측정 장치 Ultium 3D Motion IMU(Noraxon USA Inc., Scottsdale, AZ, USA)를 사용하여 수행하였다. IMU 센서는 경골 전방 원위부에 위치하도록 하였으며, 제조사 지침에 따라 탄성 밴드와 키네시오 테이프를 이용해 움직임을 최소화 하였다. 측정 전 참가자는 해부학적 자세에서 정지 상태를 유지하며 센서 캘리브레이션을 수행하였다. 가속도 데이터는 200 Hz로 수집되었으며, 모든 데이터는 MR 4.0 소프트웨어(Noraxon)를 이용하여 저장 및 분석하였다. 산소섭취량 측정은 휴대용 호흡가스 분석기인 VO_2 MasterAnalyzer(VO_2 MasterHealth Sensors, Canada)를 사용하였다. 장비 전원 켜기 후 약 10초간 정지 상태에서 제로 보정(zero calibration)을 수행하였으며, 제조사 지침에 따라 캘리브레이션 주사기를 이용한 유량(flow) 센서 보정 및 주변 공기 기준 기체(O_2) 센서 보정을 실시하였다. 모든 보정이 완료된 이후 장비는 breath-by-breath 방식으로 VO_2를 측정하였으며, 해당 기기의 운동 중 VO_2 측정 타당도와 신뢰도는 선행연구에서 검증된 바 있다(Montoye et al., 2020).

실험 절차

보행 및 달리기 시 나타나는 생체역학 및 생리학적 반응을 정량적으로 분석하기 위해, 본 연구는 Noraxon IMU를 이용한 경골 충격 측정을 포함한 표준화된 측정 프로토콜을 적용하였다. 그리고 VO_2Master Analyzer를 이용한 산소섭취량(VO_2) 측정, Polar H10을 이용한 심박수 기록을 하였다. 야외 표면(콘크리트, 우레탄, 코르크)에서 맨발로 수행하는 특성을 고려하여, 모든 조건은 사전에 표면의 이물질(자갈, 유리 조각 등)과 미끄럼 위험 요소를 점검·제거한 후 진행하였다. 실험 중 통증, 피부 손상, 불편감이 발생할 경우 즉시 중단하도록 안내하였고, 연구자는 구간 주변에서 안전을 모니터링하였다. 보행 및 달리기 측정은 30 m 직선 구간에서 수행되었으며, 가속과 감속 구간이 보행 및 달리기 분석에 미치는 영향을 최소화하기 위해 선행연구의 절차를 참고하여(Klotzbier et al., 2021)각 끝 지점의 콘을 지난 후 추가로 3 m 이동한 지점에서 회전하도록 하였다. 속도는 보행 1.4 m/s, 달리기 2.6 m/s로 설정하였으며(Jin & Hahn, 2019), 30 m 통과 시간 보행 약 21.4초, 달리기 11.5초 을 기준으로 스톱워치를 사용해 실시간 속도 피드백을 제공하였다. 동일한 속도에서 표면 간 상대적 반응을 비교하기 위해 달리기는 고강도가 아닌 보행보다 충격이 상대적으로 큰 통제 달리기 조건으로 정의하였다. 참가자는 목표 속도에 적응할 수 있도록 각 조건별로 2회 예행 연습을 수행하였다. 본 측정은 각 바닥 재질 콘크리트, 우레탄, 코르크에 대해 보행 6분, 달리기 6분으로 구성되었으며, 모든 조건에서 참가자는 신발을 착용하지 않은 맨발 상태로 수행하였으며, 선행연구에서도 동일 신발 착용(shod) 조건에서 표면 효과가 개인별로 다르게 나타나 '신발–표면 상호작용'과 개별 적응을 고려해야 한다고 보고되어(Dixon et al., 2000), 본 연구는 표면 재질 자체의 영향을 보기 위해 맨발 조건을 적용하였으며 무작위 순서로 진행되었다〈Fig. 3〉. 측정은 연속 변인을 확보하기 위해 동일한 구간과 동일한 보행·달리기 속도에서 수행되었으며, 조건 간에는 생리적 회복을 위한 충분한 휴식시간을 제공하였다.

자료 분석

본 연구는 다양한 바닥 재질에 따른 생체역학 및 생리학적 반응을 비교하기 위해 경골 가속도, 산소섭취량, 그리고 심박수를 측정하였다. 본 연구의 가속도계 자료는 MR 4.0(Noraxon,USA)를 사용하여 수집하였다. 가속도계 자료는 수집 과정에서 발생되는 오차(random error)를 최소화하기 위해 4차 Butterworth 저역통과 필터를 적용하여 전처리하였으며, 이때 차단 주파수(cut-off frequency)는 50 Hz로 설정하였다. 분석에는 충격 전달을 가장 민감하게 반영하는 수직방향 Z축 성분을 사용하였다(Shao et al., 2023). 경골 충격(tibial

Fig. 3. Experimental setup

Table 2. Tibial acceleration during walking and running across surface materials

Variable	Condition	S1	S2	S3	S4	M±SD	CV(%)
Walking tibial acceleration (mG)	concrete	3936.55	4413.95	4424.22	2772.61	3886.83±776.88	20.0
	polyurethane	3298.74	5203.36	5322.19	2371.29	4048.90±1452.72	35.9
	cork	3788.63	3956.07	3790.60	1963.73	3374.76±943.95	28.0
Running tibial acceleration (mG)	concrete	8907.40	6780.00	6561.98	13151.59	8850.24±3056	34.5
	polyurethane	8951.60	8189.99	9737.20	10810.64	9422.36±1120	11.9
	cork	8709.00	6790.73	8502.00	10000.93	8500.67±1318	15.5

Table 3. Oxygen consumption and heart rate during walking across surface materials

Variable	Condition	S1	S2	S3	S4	M±SD	CV(%)
VO_2 (mL/kg/min)	concrete	16.76	12.21	13.56	16.15	14.67±2.15	14.7
	polyurethane	15.88	10.55	13.27	13.99	13.42±2.21	16.5
	cork	16.88	11.57	12.02	16.97	14.36±2.93	20.4
HR(bpm)	concrete	91.38	123.98	117.55	135.20	117.03±18.59	15.9
	polyurethane	92.28	112.83	110.52	121.32	109.24±12.22	11.2
	cork	82.88	106.60	92.73	113.55	98.94±13.52	13.7

mean(M)±standard deviation(SD), coefficient of variation(CV)

Table 4. Oxygen consumption and heart rate during running across surface materials

Variable	Condition	S1	S2	S3	S4	M±SD	CV(%)
VO_2 (mL/kg/min)	concrete	47.49	29.66	27.46	34.58	34.79±8.97	25.8
	polyurethane	46.93	32.15	30.93	34.57	36.14±7.35	20.3
	cork	44.92	33.58	30.15	35.81	36.11±6.32	17.5
HR(bpm)	concrete	145.72	179.48	174.15	184.55	170.98±17.37	10.2
	polyurethane	151.73	176.28	167.95	181.00	169.24±12.86	7.6
	cork	133.45	171.95	161.40	179.33	161.53±12.86	8.0

mean(M)±standard deviation(SD), coefficient of variation(CV)

shock)은 각 조건에서 과제 시작 직후 수행된 첫 번째 왕복 구간의 가속도 신호를 이용하여 산출하였다. 해당 왕복 1회 동안 연속된 신호의 착지 순간의 가속도 최대값을 추출한 뒤, 추출된 최대값들의 평균을 개인별 대표값으로 정의하였다.VO_2 및 HR 분석에는 운동이 안정 상태에 도달하는 마지막 2분의 자료를 사용하였다(Bae et al., 2024).변동계수(coefficient of variation, CV)는 표준편차의 값을 평균으로 나눈 값(SD/Mean×100, %)으로, 평균 대비 변동 정도를 나타내는 지표이다. 본 연구는 코르크 표면의 적용 가능성을 탐색하고 후속 연구 설계를 위한 기초자료를 확보하기 위한 파일럿 연구로서 표본수가 제한적이다. 따라서 가설검정 중심의 해석보다는 반복측정 조건에서의 개별 반응 양상과 조건 간 개인별 차이의 크기를 기술하는 데 초점을 두었다.

연구결과

보행 시 경골 가속도는 코르크 조건(3374.76±943.95 mG)에서 가장 낮았으며, 콘크리트(3886.83±776.88 mG), 우레탄(4048.90±1452.72 mG) 순으로 나타났다(Table 2). 개인별로는 4명 중 3명(S2, S3, S4)에서 코르크 조건이 가장 낮은 경골 충격을 보였다. 달리기 시 경골 가속도는 표면 간 일관된 패턴이 뚜렷하지 않았으며, 조건별 변동계수(CV)가 11.9–34.5%로 확인되었다(Table 2). 보행 시 산소섭취량(VO_2)은 콘크리트 14.67±2.15, 우레탄 13.42±2.21, 코르크 14.36±2.93 mL/kg/min으로 조건 간 평균 차이는 크지 않았고, 조건별 CV는 14.7–20.4% 범위였다(Table 3). 반면 보행 시 심박수(HR)는 코르크(98.94±13.52 bpm), 우레탄(109.24±12.22 bpm), 콘크리트(117.03±18.59 bpm) 순으로 네 명 모두에서 동일한 방향의 변화가 관찰되었으며, 조건별 CV는 11.2–15.9%였다(Table 3). 달리기 시 VO_2는 콘크리트 34.79±8.97, 우레탄 36.14±7.35, 코르크 36.11±6.32 mL/kg/min으로 표면 조건 간 뚜렷한 차이는 확인되지 않았고, 조건별 CV는 17.5–25.8%로 나타났다(Table 4). 달리기 시 HR은 코르크(161.53±12.86 bpm), 우레탄(169.24±12.86 bpm), 콘크리트(170.98±17.37 bpm) 순으로 보행과 유사한 경향을 보였으며, 조건별 CV는 7.6–10.2%였다(Table 4).

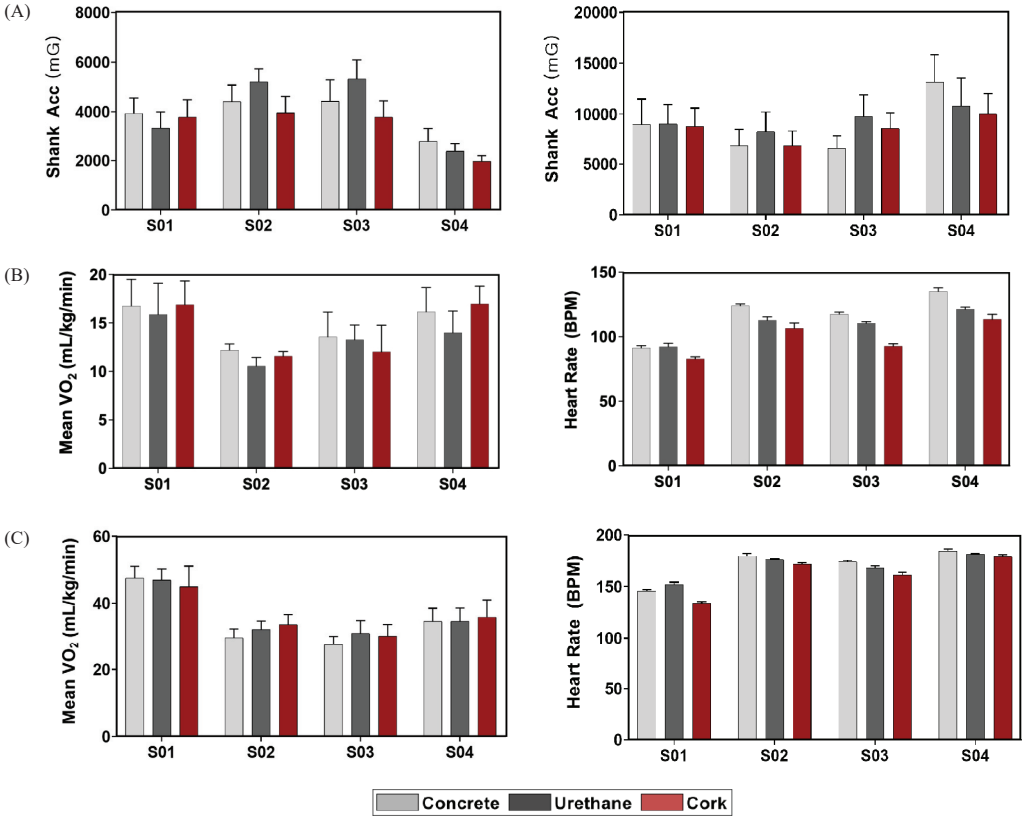

Fig. 4. Biomechanical and physiological responses during walking and running on different surface materials. (A) Tibial shock during walking (left) and running (right) across concrete, urethane, and cork surfaces for each participant. (B) Mean oxygen consumption (VO_2) and heart rate during walking across surface conditions. (C) Mean oxygen consumption (VO_2) and heart rate during running across surface conditions. Values are presented as mean ± standard deviation for each subject. VO_2 is expressed as mL/kg/min and heart rate as beats per minute (bpm).

논 의

본 연구는 콘크리트 우레탄 코르크 세 가지 바닥표면이 보행 및 달리기 수행 시 경골 충격, 산소섭취량, 심박수에 미치는 영향을 비교하여 표면 특성에 따른 생체역학 및 생리학적 반응을 확인하였다. 연구 결과 경골 충격의 경우 보행에서는 코르크에서 가장 낮은 값이 관찰된 피험자가 가장 많았으나, 달리기에서는 표면에 따른 공통적인 패턴이 나타나지 않았다. 심박수는 보행과 달리기 모두에서 코르크, 우레탄, 콘크리트 순으로 비교적 동일한 방향의 경향을 보였으나, 그 차이는 제한적이었다. 반면 산소섭취량은 변동 폭이 커 특정 표면에서 일관되게 높거나 낮게 나타나는 양상은 확인되지 않았다. 보행 조건에서 심박수는 네 명의 피험자 모두에게서 코르크가 가장 낮고 콘크리트가 가장 높은 값을 보여 표면 순응성과 심혈관 반응 간의 잠재적 연관성을 시사하였다. 그러나 이러한 차이는 절대값 기준으로 크지 않았으며, 산소섭취량에서는 동일한 패턴이 재현되지 않았다. 이는 표면 재질에 따른 반응의 차이는 조건에 따라 나타나지 않을 수 있다. 실제로 Skelly et al.(2003)의 연구에서는 서로 다른 순응성의 표면에서 스텝 에어로빅을 수행할 때 산소섭취량과 심박수 에서 유의한 차이가 나타나지 않았으며, 달리기 시 트레드밀 표면 강성 변화에 따른 심박수 차이가 통계적으로 뚜렷하지 않아, 표면 특성이 심박수에 미치는 영향이 제한적일 수 있음을 시사했다(Hardin et al., 2004). 또한 실제 환경의 보행 연구에서는 표면 변화에 따라 대사 에너지 소비가 달라질 수 있으나, 그 영향은 보행 변동성이나 스윙 발 들림 높이 등 보행 양상과 함께 나타나는 것으로 보고되었다(Kowalsky et al., 2021). 따라서 본 연구에서 관찰된 산소섭취량과 심박수 차이가 표면 특성만의 직접적 효과로 해석되기 어렵다는 점과 일치한다. 달리기 조건에서도 심박수는 보행과 유사한 경향을 보였으나, 산소섭취량은 전신 수준에서 대사 에너지 소비의 대리 지표로서 총 근육 에너지 요구량을 반영하며, 이는 근육의 활성화·동원 양상과 수축 역학(단축/신장 및 수축 속도), 그리고 힘줄 탄성 에너지의 저장–방출에 따른 기계적 효율 변화에 의해 달라질 수 있다(Umberger et al., 2011).또한 근육의 동시수축 증가나 착지 전략 변화는 기계적 일의 증가 없이도 대사 비용을 높일 수 있어 표면과 VO_2의 관계는 개인별로 비선형적으로 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서 특정 표면에서 VO_2가 일관되게 높거나 낮은 패턴이 없었던 것은, 표면 강성 자체보다 착지 전략·하지 강성 조절·근활성 패턴 등 개인 특성의 영향이 더 컸기 때문일 수 있다(Moore et al., 2019).이를 종합하면, 산소섭취량은 심박수 보다 표면 특성에 덜 민감하게 반응하며, 특히 달리기와 같이 높은 충격이 발생하는 조건에서는 표면보다 개인 특성이 생리적 반응에 더 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

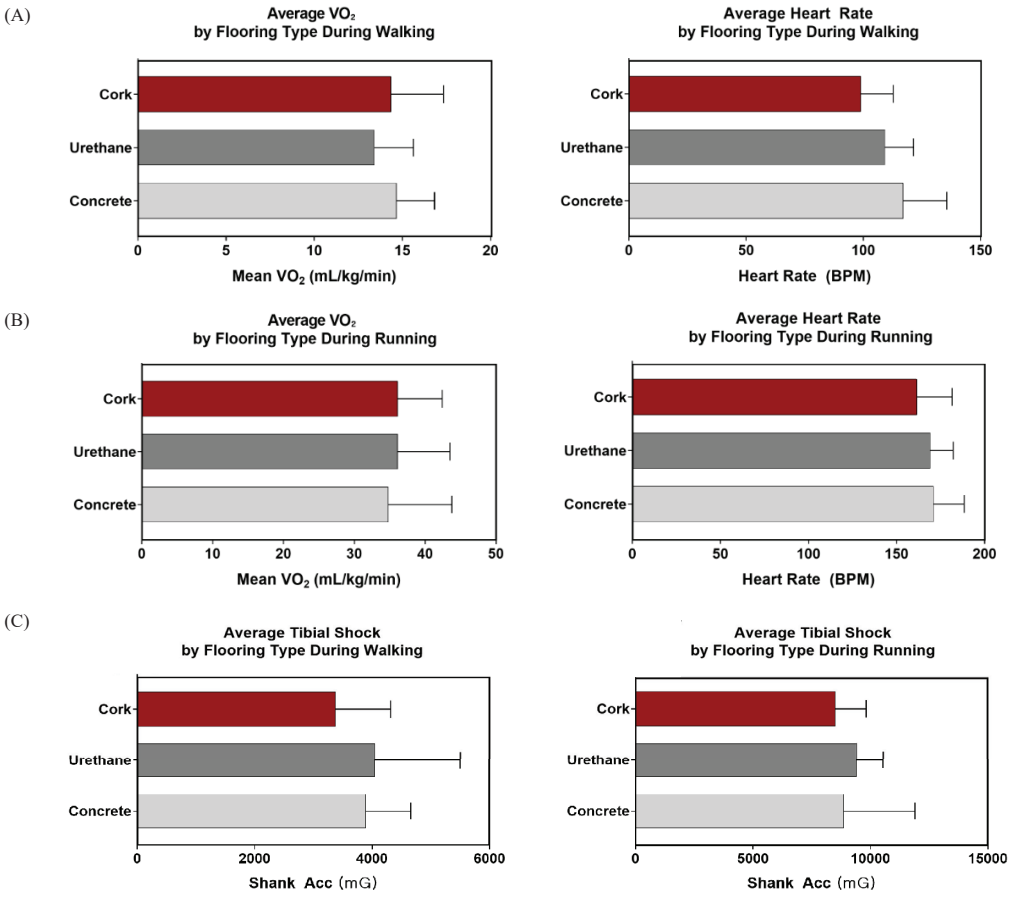

Fig. 5. Mean biomechanical and physiological responses across surface materials during walking and running. (A) Mean oxygen consumption (VO_2) and heart rate during walking on concrete, urethane, and cork surfaces, averaged across four participants. (B) Mean oxygen consumption (VO_2) and heart rate during running on concrete, urethane, and cork surfaces, averaged across four participants. (C) Mean tibial shock during walking (left) and running (right) on each surface material, averaged across four participants.

경골 충격의 경우 표면 특성에 따른 차이가 생리적 지표보다 명확하게 드러났다. 보행에서는 피험자 4명 중 3명(S02, S03, S04)에서 코르크 조건에서 가장 낮은 충격이 관찰되었으며, 콘크리트가 가장 낮은 충격을 보인 피험자는 없었다. 이는 보행과 같이 운동 패턴이 비교적 일관되고 변동성이 낮은 조건에서는, 코르크가 가지는 점탄성 기반의 에너지 흡수 및 충격 감쇠 특성이 착지 시 전달되는 충격을 완화하는 방향으로 보다 명확하게 작용했을 가능성을 시사한다(Antunes et al., 2024). 반면 달리기의 경우 피험자별로 가장 낮은 충격값을 보인 표면은 코르크 또는 콘크리트 등 서로 다르게 나타났으며, 특정 바닥재가 모든 참가자에서 가장 낮은 충격값을 나타내는 결과는 없었다. 이는 달리기 중 충격 부하와 관련된 반응이 표면 물성 뿐만 아니라 개인의 생체역학적 특성과 피로 상태에 따라 달라질 수 있음을 시사한다(Waśkiewicz et al., 2025). 또한, 근피로 상태나 근육–힘줄 단위의 점탄성 특성 차이는 동일 표면에서도 서로 다른 충격 전달 양상을 유발할 수 있다(Flynn et al., 2004).즉, 달리기와 같은 충격 조건에서는 표면 특성과 개인 특성이 복합적으로 작용하여 충격의 변동성이 증가할 수 있다.

본 연구는 몇 가지 한계점을 가진다. 첫째, 피험자 수가 적어 통계적 검정력을 확보하기 어렵고, 결과는 경향성 수준에서 해석해야 하며, 참가자들은 20대 건강한 남성이었기 때문에 여성, 고령자, 집단으로의 일반화에는 제한이 있다. 둘째, 보행과 달리기 속도를 단일 조건으로 설정하여 속도 변화에 따른 표면 반응 차이를 평가할 수 없었다. 셋째, 바닥재의 강성, 감쇠비, 탄성계수 등 물리적 특성을 직접 측정하지 않아 표면 물성과 충격 전달 메커니즘 간 관계를 정량적으로 규명하는 데 제한이 있었다. 이러한 한계에도 불구하고 본 연구는 코르크 표면의 생체역학 및 생리학적 반응을 직접 비교한 파일럿 연구로서, 향후 대규모 연구 설계와 바닥재 개발의 기초 근거를 제공한다는 점에서 의의가 있다. 특히 코르크 표면은 보행에서 경골 충격을 낮추는 경향을 보였으며, 달리기에서도 일부 피험자에게서 충격 완화 특성이 확인되어 실제 운동 수행 환경에서의 적용 가능성을 보여준다. 또한 코르크는 친환경성과 지속가능성을 갖춘 소재로 주목받고 있으며(Knapic, 2016), 본 연구 결과는 이러한 소재가 생체역학적 측면에서도 긍정적 영향을 제공할 수 있음을 시사한다. 향후 연구에서는 더 큰 표본 규모, 다양한 운동 속도 조건, 그리고 바닥재 물성치의 정량적 분석을 포함하여 코르크 기반 표면의 생리적·역학적 효과를 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다.

결론 및 제언

본 연구는 콘크리트 우레탄 코르크 표면에서 보행(1.4 m/s)과 달리기(2.6 m/s) 수행 시 경골 충격, 산소섭취량, 심박수를 비교한 파일럿 연구이다. 그 결과, 보행 시 경골 충격은 대부분의 피험자에서 코르크 조건에서 낮게 나타났으며, 콘크리트가 가장 낮은 값을 보인 경우는 없었다. 달리기에서는 경골 충격의 표면 간 차이가 개인별로 상이하게 나타나, 고충격 조건에서는 표면 특성뿐 아니라 개별적인 착지 전략과 하지 강성 조절 등이 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다. 심박수는 보행과 달리기 모두에서 코르크, 우레탄, 콘크리트 순으로 증가하는 비교적 동일한 방향의 경향을 보였으며, VO_2는 표면에 따른 뚜렷한 패턴을 보이지 않았다.

본 파일럿 자료를 바탕으로 사후 검정력 분석을 수행한 결과, 경골 충격, 산소섭취량, 심박수에서 중간 정도의 효과크기를 반복측정 설계로 검출하기 위해서는 조건당 약 15~20명 수준의 표본이 필요할 것으로 추정되었다. 이는 향후 코르크 바닥재의 생체역학 및 생리학적 효과를 검증하기 위한 후속 연구 설계에서 표본 크기를 설정하는 데 도움을 줄 수 있다. 다만 후속 연구에서는 다양한 속도 조건을 포함하여 표면 강성과 운동 강도의 상호작용을 평가하고, 바닥재의 강성·감쇠·탄성계수 등 물리적 물성을 정량적으로 측정하며, 여성, 고령자, 등 보다 다양한 대상자를 포함하는 방향으로 프로토콜을 개선·확장할 필요가 있다. 이러한 보완을 통해 코르크 기반 바닥재의 충격 효과와 생리적 부담을 보다 정밀하게 규명하고, 안전하고 친환경적인 스포츠·운동 시설 설계에 기초 자료를 제공할 수 있을 것이다.

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: Siddhartha Bikram Panday, Data curation: Guk-hyeon Kim, Kailin, Xing, Zhu, Fang, Formal analysis: Jae-gon Ko, Eul-seob An, Investigation: Guk-hyeon Kim,Kailin, Xing, Project administration: Jae-gon, Ko, Siddhartha Bikram Panday, Writing-original draft preparation: Guk-hyeon Kim, Writing-review and editing: Siddhartha Bikram Panday

참고문헌

Antunes e Sousa, G. J., Silva, A. J., Serra, G. F., Fernandes, F. A., Silva, S. P., & Alves de Sousa, R. J. (2024). Experimental and numerical insights into the multi-impact response of cork agglomerates. *Materials, 17*(19), 4772.

Bae, W. R., Seo, Y., Yun, S., & Lee, D. T. (2024). Determination of moderate walking intensity using step rate and VO_2 reserve in healthy men. *BMC Public Health, 24*(1), 403.

Dixon, S. J., Collop, A. C., & Batt, M. E. (2000). Surface effects on ground reaction forces and lower extremity kinematics in running. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 32*(11), 1919-1926.

Fernandes, F. A. O., Pascoal, R. J. S., & De Sousa, R. A. (2014). Modelling impact response of agglomerated cork. Materials & Design, 58, 499-507.

Flower, D. J., & Sanjayan, J. G. (2007). Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. The International Journal of Life Cycle Assessment, 12(5), 282-288.

Flynn, J. M., Holmes, J. D., & Andrews, D. M. (2004). The effect of localized leg muscle fatigue on tibial impact acceleration. *Clinical Biomechanics, 19*(7), 726-732.

Grant, B., Charles, J., Geraghty, B., Gardiner, J., D'Août, K., Falkingham, P. L., & Bates, K. T. (2022). Why does the metabolic cost of walking increase on compliant substrates? *Journal of the Royal Society Interface, 19*(196), 20220483.

Hardin, E. C., Van Den Bogert, A. J., & Hamill, J. (2004). Kinematic adaptations during running: Effects of footwear, surface, and duration. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 36*(5), 838-844.

Jardin, R. T., Fernandes, F. A. O., Pereira, A. B., & De Sousa, R. A. (2015). Static and dynamic mechanical response of different cork agglomerates. *Materials & Design, 68*, 121-126.

Jin, L., & Hahn, M. E. (2019). Comparison of lower extremity joint mechanics between healthy active young and middle age people in walking and running gait. *Scientific Reports, 9*(1), 5568.

Kanyanta, V., & Ivankovic, A. (2010). Mechanical characterisation of polyurethane elastomer for biomedical applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 3*(1), 51-62.

Kerdok, A. E., Biewener, A. A., McMahon, T. A., Weyand, P. G., & Herr, H. M. (2002). Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses. *Journal of Applied Physiology, 92*(2), 469-478.

Klotzbier, T. J., Wollesen, B., Vogel, O., Rudisch, J., Cordes, T., Jöllenbeck, T., & Vogt, L. (2021). An interrater reliability study of gait analysis systems with the dual task paradigm in healthy young and older adults. *European Review of Aging and Physical Activity, 18*(1), 17.

Knapic, S., Oliveira, V., Machado, J. S., & Pereira, H. (2016). Cork as a building material: A review. *European Journal of Wood and Wood Products, 74*(6), 775-791.

Kowalsky, D. B., Rebula, J. R., Ojeda, L. V., Adamczyk, P. G., & Kuo, A. D. (2021). Human walking in the real world: Interactions between terrain type, gait parameters, and energy expenditure. *PLoS ONE, 16*(1), e0228682.

Liu, G., Zheng, W., & Wang, H. (2020). Influence of ambient temperature on TVOC released from polyurethane athletics track. In *Proceedings of the 13th Conference of the International Sports Engineering Association* (Vol. 49, No. 1, Article 1). MDPI. https://doi.org/10.3390/proceedings2020049001

Maderuelo-Sanz, R., Barrigón Morillas, J. M., & Gómez Escobar, V. (2014). Acoustical performance of loose cork granulates. *European Journal of Wood and Wood Products, 72*(3), 321-330.

Montoye, A. H., Vondrasek, J. D., & Hancock, J. B. (2020). Validity and reliability of the VO_2 Master Pro for oxygen consumption and ventilation assessment. *International Journal of Exercise Science, 13*(4), 1382.

Moore, I. S., Ashford, K. J., Cross, C., Hope, J., Jones, H. S., & McCarthy-Ryan, M. (2019). Humans optimize ground contact time and leg stiffness to minimize the metabolic cost of running. *Frontiers in Sports and Active Living, 1*, 53.

Oliveira, G., & Costa, A. (2012). How resilient is Quercus suber L. to cork harvesting? A review and identification of knowledge gaps. *Forest Ecology and Management, 270*, 257-272.

Rao, Y., Yang, N., Gao, T., Zhang, S., Shi, H., Lu, Y., & Huang, H. (2024). Effects of peak ankle dorsiflexion angle on lower extremity biomechanics and pelvic motion during walking and jogging. *Frontiers in Neurology, 14*, 1269061.

Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island: A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26*, 224-240.

Shao, E., Mei, Q., Baker, J. S., Bíró, I., Liu, W., & Gu, Y. (2023). The effects of non-Newtonian fluid material midsole footwear on tibial shock acceleration and attenuation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11*, 1276864.

Sheerin, K. R., Reid, D., & Besier, T. F. (2019). The measurement of tibial acceleration in runners: A review of the factors that can affect tibial acceleration during running and evidence-based guidelines for its use. *Gait & Posture, 67*, 12-24.

Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., & Reis, R. L. (2005). Cork: Properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews, 50*(6), 345-365.

Skelly, W. A., Darby, L. A., & Phillips, K. (2003). Physiological and biomechanical responses to three different landing surfaces during step aerobics. *Journal of Exercise Physiology Online, 6*(2), 70-79.

Spampinato, G., Massimo, D. E., Musarella, C. M., De Paola, P., Malerba, A., & Musolino, M. (2018, May). Carbon sequestration

by cork oak forests and raw material to built up post carbon city. *In International Symposium on New Metropolitan Perspectives* (pp. 663-671). Cham: Springer International Publishing.

Umberger, B. R., & Rubenson, J. (2011). Understanding muscle energetics in locomotion: new modeling and experimental approaches. *Exercise and Sport Sciences Reviews, 39*(2), 59-67.

Warden, S. J., Edwards, W. B., & Willy, R. W. (2021). Preventing bone stress injuries in runners with optimal workload. *Current Osteoporosis Reports, 19*(3), 298-307.

Waśkiewicz, Z., Akbaş, A., Grzywacz, T., & Borysiuk, Z. (2025). Footwear technology and biomechanical adaptations in ultramarathon running: a PRISMA-Guided narrative review integrating direct and laboratory evidence. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 13*, 1642555.

Xiang, L., Gao, Z., Wang, A., Shim, V., Fekete, G., Gu, Y., & Fernandez, J. (2024). Rethinking running biomechanics: a critical review of ground reaction forces, tibial bone loading, and the role of wearable sensors. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12*, 1377383.

Zhuang, Y., Zhou, W., Zeng, Z., Mo, S., & Wang, L. (2025). Influences of footstrike patterns and overground conditions on lower extremity kinematics and kinetics during running: Statistical parametric mapping analysis. *PLoS ONE, 20*(2), e0317853.

바닥 재질에 따른 생체역학 및 생리학적 비교: 코르크·우레탄·콘크리트 기반 반복측정 파일럿 연구

김국현[1], 헝개린[1], 방주[1], 안을섭[2], 고재곤[3], 시다르타 비크람 판데이[4*]

[1]한양대학교 체육학과, 박사과정
[2]대림대학교 스포츠재활학부, 교수
[3]여주대학교 스포츠경호학부, 부교수
[4]한양대학교 스포츠산업과학부, 부교수

*교신저자: 시다르타 비크람 판데이(siddartha@hanyang.ac.kr)

[목적] 본 연구는 콘크리트, 우레탄, 코르크의 세 가지 바닥 재질에서 보행과 달리기 수행 시 나타나는 생체역학적 및 생리학적 반응의 차이를 탐색적으로 조사하는 데 목적이 있다.
[방법] 건강한 성인 남성 4명을 대상으로 무작위 반복측정 설계를 적용하여 각 바닥 재질에서 맨발 보행(1.4 m/s)과 달리기(2.6 m/s)를 수행하도록 하였다. 경골 충격은 경골 원위부에 부착한 무선 관성측정장치(IMU)를 이용하여 수직 가속도를 측정하였으며, 산소섭취량(VO_2)과 심박수(HR)는 휴대용 호흡가스 분석기와 심박수 측정기를 사용하여 기록하였다.
[결과] 보행 시 경골 충격은 대부분의 피험자에서 코르크 표면에서 낮게 나타났다. 반면 달리기에서는 표면에 따른 동일한 방향의 변화가 관찰되지 않았다. 심박수는 보행과 달리기 모두에서 비교적 안정적인 경향을 보였으며, 코르크 표면에서 낮고 콘크리트 표면에서 높은 값을 나타냈다. 산소섭취량은 피험자별 변동이 커 표면 조건 간 뚜렷한 차이는 확인되지 않았다.
[결론] 본 연구 결과, 코르크 표면은 보행 시 경골 충격을 완화하는 데 있어 생체역학적 이점을 제공할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 반면 생리학적 반응은 바닥 재질의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 판단된다. 또한 본 연구는 향후 바닥 재질이 보행 및 달리기 수행에 미치는 영향을 검증하기 위한 대규모 연구 설계에 있어 본 실험 프로토콜의 실행 가능성을 뒷받침하는 기초 자료를 제공한다.

주요어
표면 재질, 경골 충격, 코르크, 지속가능 소재, 보행, 달리기