



Original Article

Analysis of Biomechanical Differences According to Midsole Material and Plate Insertion of Running Shoes

Soo-ji Han¹, Jusung Lee², Sanghyuk Han² and Jongchul Park^{3*}

¹Industry Foundation, Pukyong National University

²Human Performance Laboratory, Descente Footwear R&D Center

³Division of Smart Healthcare, Pukyong National University

Article Info

Received 2025. 03. 26.

Revised 2025. 04. 23.

Accepted 2025. 05. 07.

Correspondence*

Jongchul Park

jcpark@pknu.ac.kr

Key Words

Midsole material,
Carbon plate,
Multi-segment foot model,
Statistical parametric mapping,
Advanced footwear technology

This research was supported by the Pukyong National University Industry-university Cooperation Foundation's 2024 Post-Doc. support project.

PURPOSE This study examined the biomechanical differences in running shoes with two midsole materials, ethylene-vinyl acetate (EVA) and polyether block amide (PEBA), and carbon fiber plate insertion. **METHODS** Ten recreational runners participated in the study and performed running trials on a 12m runway at a controlled speed of 3.89 m/s $\pm$ 5%. Biomechanical data were obtained for time-continuous variables of the metatarsophalangeal (MTP) joint (angle, moment, and power), as well as for discrete variables (push-off time, peak vertical impact force, peak anterior propulsion force, and timing of joint power transition). Data were analyzed using statistical parametric mapping for continuous data and the Wilcoxon signed-rank test for discrete variables ($\alpha = .05$). **RESULTS** Compared with no-plate conditions, the EVA sole with plate significantly reduced push-off time, MTP joint range of motion, positive joint power, and peak anterior propulsion force, with an earlier timing of joint power transition ($p < .05$). In contrast, the PEBA sole with plate decreased MTP joint range of motion but increased plantar flexion moment, negative joint power, and push-off time ($p < .05$). Furthermore, under plate-inserted conditions, PEBA significantly increased plantar flexion moment, negative joint power, and push-off time, as well as exhibited a delayed timing of joint power transition compared with EVA ($p < .05$). **CONCLUSIONS** The interaction between midsole material and plate insertion causes complex variations in MTP joint energy management. Specifically, EVA shoes with a plate may facilitate rapid roll-off and promote swift turnover, thereby enhancing acceleration. In contrast, PEBA shoes with a plate may promote prolonged energy absorption, which could potentially reduce joint fatigue during long-distance running.

서론

러닝화는 단순한 스포츠 용품을 넘어 러너의 상해 예방과 퍼포먼스 향상에 중요한 역할을 한다. 그중에서도 미드솔(midsole) 폼(foam)의 소재와 구조는 착지 시 발생하는 충격 완화 및 추진력 증가에 기여한다는 점에서 러너의 피로도를 감소시키는 핵심적인 요소라고 할 수 있다(Xu et al., 2025). 적절한 미드솔의 쿠셔닝(cushioning)과 반발력은 효율적인 에너지 활용을 돕는 반면, 부적절한 신발의 착용

은 족저근막염이나 무릎 통증, 피로골절 등의 부상을 유발할 수 있다(Malisoux et al., 2017). 이에 따라 러닝화의 미드솔 폼의 소재와 구조 변경이 달리기 효율성과 상해 예방에 미치는 영향을 분석하는 연구들이 활발히 수행되고 있다(Lin et al., 2022).

특히, Nike Zoom Vaporfly 4%가 출시되면서 곡선형 카본 플레이트(curved carbon fiber plate) 삽입이 달리기 효율성을 극대화시킨다는 연구 결과가 보고됨에 따라, 카본 플레이트를 삽입한 러닝화 연구개발이 꾸준히 수행되어 왔다. 카본 플레이트의 삽입은 러닝화의 종 방향 강성(longitudinal stiffness)을 증가시켜 중족지관절(metatarsophalangeal joint, MTP joint)의 과도한 저축굴곡(plantar flexion)을 제어할 수 있다(Stefanyshyn & Nigg, 2000). 이러한 기전을 통해 지면을 밀어내는 구간(push-off phase) 동안 에너지 손실을 줄이고 더 큰 추진 토크를 생성함으로써, 결과적으로 추

(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.

진력과 퍼포먼스를 향상시킬 수 있다(Day & Hahn, 2019; Roy & Stefanyshyn, 2006).

현재까지 카본 플레이트의 효과를 검증한 연구들은 주로 EVA (ethylene vinyl acetate)와 PEBA (polyether block amide) 소재의 미드솔에 플레이트를 삽입하여 러닝 효율성(running economy)을 분석하여 수행되었다(Ghanbari et al., 2025; Matties, 2024; Perry et al., 2024; Subramaniam, 2024). EVA는 저밀도 공중합체(low-density copolymer)로 구성되어 있으며 비교적 부드럽고 유연한 특성이 있어 충격 흡수력이 우수하지만(Wang & Wang, 2022), 낮은 반발력으로 인해 에너지 손실이 크다는 특징이 있다(Chang et al., 2023). Xu et al. (2025)는 EVA의 단점을 보완하기 위해 카본 플레이트를 삽입함으로써 에너지 손실을 줄이고 반발력을 보완할 수 있다고 주장하였으며, Subramaniam (2024)은 EVA에 카본 플레이트를 삽입 시 러닝 효율성을 약 2.1% 향상시킬 뿐만 아니라, 착지 시 충격력을 줄이고 추진력을 증가시키는 역할을 한다고 보고하였다. 한편, PEBA는 열가소성 탄성체(thermoplastic elastomer)로 구성되어 있어 높은 반발력을 제공하지만, 카본 플레이트 추가에 따른 추진력 증가 효과는 명확하게 보고되지 않았다(Perry et al., 2024). 실제로 Ghanbari et al. (2025)는 PEBA와 카본 플레이트의 조합이 착지 시 충격력을 감소시키지는 않지만, MTP 관절에서의 모멘트 및 파워 증가를 통해 추진력을 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 즉, EVA는 카본 플레이트가 충격 완화와 추진력 향상에 모두 기여하지만, PEBA의 경우 충격 흡수 효과보다는 MTP 관절의 운동역학적 변화를 통해 주로 추진력 향상에 기여함을 알 수 있다.

이처럼 선행 연구들은 전반적으로 플레이트의 긍정적인 효과를 보고하였다. 그러나, 소재 별 카본 플레이트 사용에 대한 직접적인 비교를 수행하지 않았거나 러닝 효율성 향상 효과만을 평가하였으며, 달리기 동작의 생체역학적 기전에 대한 분석은 제한적이다. 또한, 달리기 시 추진력 향상의 핵심적인 요소인 MTP 관절에 대한 움직임을 분석한 연구들은 특정 시점 또는 구간에서의 평균 값만을 비교하였다는 한계가 있다(Lieberman et al., 2010). 하지만, 달리기 동작은 연속적으로 움직임을 패턴이 변화하기 때문에, 단순 평균 값을 비교하는 것만으로는 러닝화의 생체역학적인 효과를 구체적으로 파악하기 어렵다는 특징이 있다. 따라서, 본 연구에서는 EVA와 PEBA 소재 미드솔의 카본 플레이트 삽입에 따른 달리기 동작의 생체역학적 변인의 차이를 시간-연속적으로 비교함으로써, 러닝화 설계 및 퍼포먼스 향상을 위한 근거를 제공하고자 한다.

연구방법

연구대상

본 연구는 주 2회 이상 달리기를 수행하고 최근 3개월 내 근골격계 부상 경험이 없는 2-30대 남성 10명(age: 26.00 ± 4.99 yrs., height: 174.40 ± 4.60 cm, body mass: 80.00 ± 9.50 kg)을 대상으로 선정하였으며(Hoogkamer et al., 2019), 신발 사이즈가 270mm인 자만을 선별하였다. 또한, 연구 수행을 위해 P 대학의 연구 윤리위원회의 승인을 받았으며, 선정된 대상자들은 동의서를 작성 후 실험을 진행하였다(2024-10-025, 2024.11.07).

신발 종류 및 기계적 특성

러닝화의 미드솔 소재에 따른 카본 플레이트의 삽입 효과를 검증하기 위해 EVA without plate, EVA with plate, PEBA without plate, PEBA with plate 네 가지 신발 조건을 사용하였다. 이때, 모든 신발은 270mm의 사이즈로 제공하였으며, 연구 기간 개시 전에는 착용되지 않았다. 또한, 플레이트가 삽입된 신발 조건은 미드솔 전체 길이에 대한 곡선형 카본 플레이트를 삽입하였다. 각 신발의 종방향 강성에 대한 기계적 굴곡 테스트는 dynamic shoe flexor device (STM 507, SATRA, Kettering, GBR)를 사용하여 측정하였으며, 50° 각도로 25회 굴곡한 후 마지막 5회의 평균값을 사용하였다. 신발의 구체적인 기계적 특성은 <Table 1>과 같다.

생체역학 실험 절차

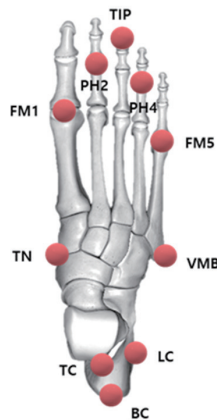
연구를 수행하기 전, 달리기가 가능한 12m 주로의 주위에 적외선 카메라(Miquis, Qualisys, SWE; sampling rate 200 Hz) 8대와 지면반력기(9260AA6, Kistler, SWI; sampling rate 1,000 Hz) 2대를 설치하였다. 또한, 주행 속도를 통제하기 위해 지면반력기의 위치로부터 전방 및 후방으로 1.5m 지점에 구간 속도 측정기(Witty, Microgate, USA)를 설치하였다. 적외선 카메라와 지면반력기의 데이터는 A/D board (Qualisys, SWE)를 사용하여 데이터의 취득 시점을 동기화(synchronize)하였으며, QTM software (Qualisys Track Manager, Qualisys, SWE)를 사용하여 자료를 취득하였다. 모든 대상자는 본 실험 전 부상 방지를 위해 충분한 준비운동(warm-up)

Table 1. Characteristics of the four running shoe conditions

Shoe code (unit)	EVA without plate	EVA with plate	PEBA without plate	PEBA with plate
Mass (g)	258.90	299.58	228.64	259.24
Midsole hardness (Asker C)	45	45	50	50
Rearfoot thickness (mm)	38.50	38.50	38.50	38.50
Forefoot thickness (mm)	32.50	32.50	32.50	32.50
Longitudinal bending stiffness (Nm)	5.40	7.60	6.50	9.30
Picture				

Table 2. Definition of anatomical marker placements

Name	Description
TC	Top of the calcaneus
BC	Bottom of the calcaneus
LC	Lateral aspect of the calcaneus
TN	Most medial apex of the navicular bone
VMB	Dorso-lateral aspect of the fifth metatarsal base
FM1	First metatarsal head
FM5	Fifth metatarsal head
PH2	Distal dorso-medial aspect of the head of the second proximal phalanx
PH4	Distal dorso-medial aspect of the head of the fourth proximal phalanx
Tip	Distal aspect of the third distal phalanx

**Fig. 1.** Multi-foot segmentation model marker set

을 수행하도록 하였으며, 네 가지 조건의 신발을 착용하여 적절한 신발 사이즈를 확인하였다. 이후, Deleu (2019) 및 Matsumoto et al. (2022)의 연구에 사용된 다중 발 분절 모델을 참고하여 본 연구 목적에 맞게 수정한 뒤 반사마커를 부착하였다(Fig. 1; Table 2).

본 실험은 네 가지 조건의 신발을 무작위로 제시하여 12m 주로 달리를 수행하도록 요청하였으며, 연구 대상자의 안정성과 달리기 동작의 일관성을 확보하기 위해 주행 속도를 3.89m/s의 $\pm 5\%$ 이내로 통제하였다(Verde et al., 2024). 실험을 통해 수집한 데이터는 연구 대상자의 우세측 발이 지면반력기에 착지한 경우를 성공적인 시도로 간주하여 각 신발 조건 당 5회의 데이터를 획득하였으며, 동작 수행 중 피로 발생을 최소화하기 위해 시도 간 적절한 휴식을 취하였다

자료처리

3차원 동작분석을 통해 수집한 데이터는 Visual3D (Has-motion, CAN) 프로그램을 사용하여 다음과 같이 자료처리를 수행하였다. 먼저, 대상자의 발 분절을 정의하기 위해 반사마커의 위치 좌표를 활용하여 발가락(phalanx)과 전족부(forefoot) 및 후족부(hindfoot) 분절을 정의하였으며, Drillis et al. (1964)의 연구를 참고하여 각 분절의 질량비를 설정하였다. 또한, MTP 관절은 첫 번째 중족골

(midtarsal) 마커에서 다섯 번째 중족골 마커 방향으로 벡터를 생성한 뒤, 단일 힌지 축으로 모델링하여 정의하였다(Day, & Hahn, 2019). 데이터 수집 과정에서 발생한 마커와 지면반력 데이터는 2차 저역통과 필터(bi-directional butterworth 2nd low-pass filter)를 양방향으로 적용하여 노이즈를 최소화하였으며, 차단 주파수는 각각 12 Hz와 100 Hz로 설정하였다(Isherwood et al., 2024). 이후 우세측 발의 수직 지면반력 값이 30N이 될 때를 임계값(threshold)으로 설정하여 착지(contact)와 이지(take off) 시점을 정의하였으며, CoP (center of pressure)의 위치가 MTP 관절 중심 축을 교차하는 순간(CoP-MTP cross)부터 이지 시점까지를 푸시오프(push-off) 구간으로 정규화(normalization)하여 분석에 사용하였다(Day & Hahn, 2019).

시간-연속적 움직임에 대한 분석 변인은 push-off 구간 동안 전족부에 대한 MTP 관절 각도(joint angle)와 관절 모멘트(joint moment) 및 관절 파워(joint power)를 산출하였으며, 이산형 변수(discrete variables)는 우세측 발의 푸시오프 시간(push-off time), 수직 지면반력의 최대 충격력(peak impact force), 전후 지면반력의 최대 추진력(peak propulsion force) 및 관절 파워의 전환 타이밍(timing of joint power transition)을 산출하여 분석에 사용하였다. 이때, 관절 파워의 전환 타이밍은 CoP-MTP cross 시점부터 MTP 관절 파워가 음수에서 양수로 전환되는 시점까지를 push-off 구간에 대해 시간 정규화하여 분석하였다.

통계 분석

EVA 및 PEBA 소재 미드솔의 카본 플레이트 삽입에 따른 달리기 동작의 생체역학적 변인의 차이를 분석하기 위해 Python 3.12.7 (Python Software Foundation, USA)를 사용하여 통계 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 미드솔 소재와 카본 플레이트의 유무에 따른 차이를 분석하기 위해 각 조건(EVA without plate vs EVA with plate; PEBA without plate vs PEBA with plate; EVA without plate vs PEBA without plate; EVA with plate vs PEBA with plate) 간 비교를 수행하였다. MTP 관절의 시간-연속적인 움직임은 spm1d 패키지에서 제공하는 시간-연속적 통계적 매핑(statistical parametric mapping, SPM) 기법을 통해 대응표본 t 검정(paired t -test)을 수행하였으며(Pataky, 2012), 이산형 변수는 일부 데이터가 정규성(normality) 가정을 만족하지 않아 Wilcoxon 부호 순위 검정(Wilcoxon signed-rank test)을 수행하였다. 이때, 모든 통계적 유의수준은 .05로 설정하였다.

연구 결과

미드솔 소재에 따른 차이

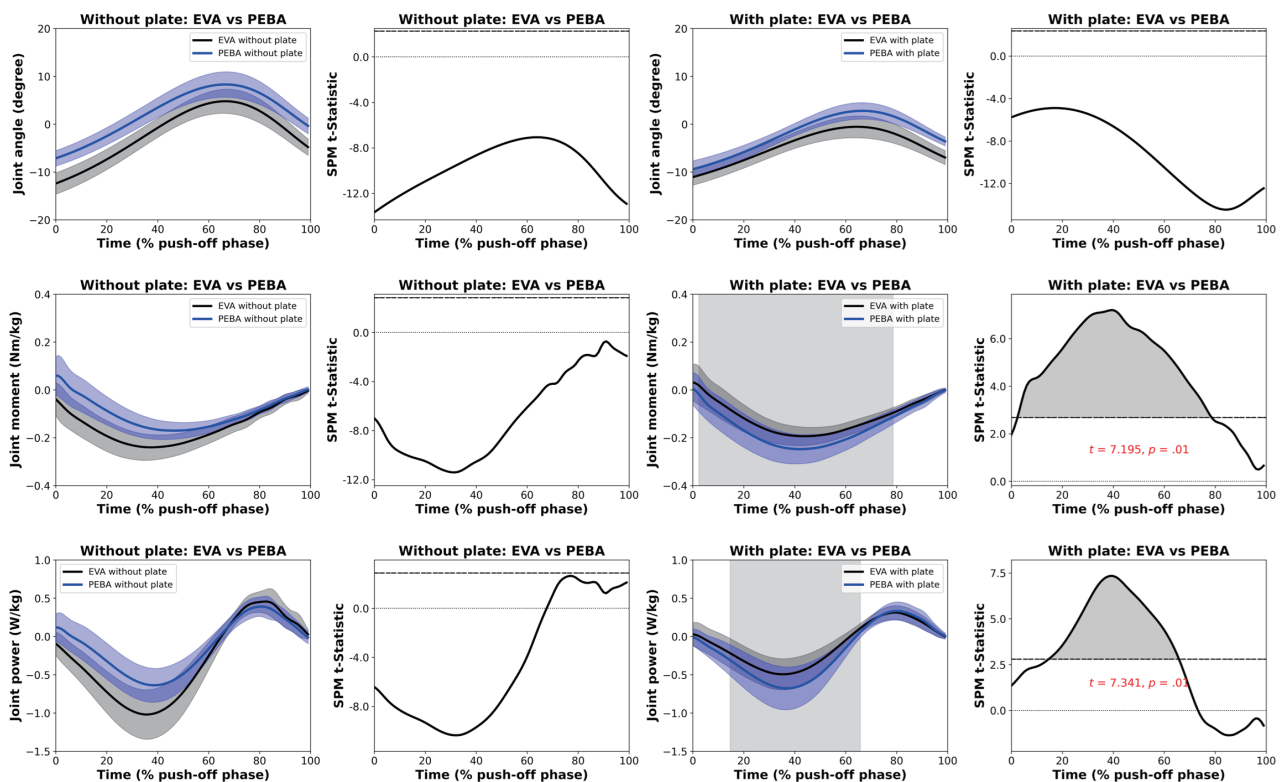
미드솔 소재에 따른 달리기 동작에 대한 생체역학 분석 결과는 다음과 같다(Fig. 2; Table 3). 플레이트가 없는 조건에서 EVA와 PEBA는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

반면, 플레이트가 있는 조건에서 EVA와 PEBA는 관절 모멘트($t=7.165$, $p=.01$)가 push-off 구간의 2.4-78.6%에서 차이를 나타냈으며, 관절 파워($t=7.609$, $p=.01$)가 14.7-65.8%에서 통계적으로 유

Table 3. Spatiotemporal and ground reaction force variables by midsole materials

(M±SD)

Variables (unit)	without plate				with plate			
	EVA	PEBA	W	p	EVA	PEBA	W	p
Push off time (ms)	98.17±8.80	97.33±9.60	1024.00	.35	94.67±8.80	100.50±7.83	323.00	.01*
Peak impact force (/BW)	1.88±0.43	1.88±0.29	1883.00	.51	1.84±0.42	1.91±0.42	1627.00	.09
Peak propulsion force (/BW)	0.37±0.05	0.36±0.05	1711.00	.18	0.35±0.05	0.35±0.05	1907.00	.57
Timing of joint power transition (% push off phase)	66.87±2.23	66.84±3.50	1583.50	.47	63.63±3.69	66.17±2.31	570.00	.01*

* $p < .05$ **Fig. 2.** Time-continuous biomechanical analysis by midsole materials (angle and moment: + dorsiflexion, - plantarflexion; power: + positive, - negative)

의한 차이를 나타냈다. 또한 push-off 시간($W=323.00$, $p=.01$)과 관절 파워의 전환 타이밍($W=570.00$, $p=.01$)에서도 통계적으로 유의한 차이가 나타났다.

플레이트 삽입 유무에 따른 차이

플레이트 삽입 유무에 따른 달리기 동작에 대한 생체역학적 분석 결과는 다음과 같다(Fig. 3; Table 4). EVA 소재에서 플레이트 삽입 유무에 대한 차이는 MTP 관절 각도가 push-off 구간의 25.6-99.0%에서 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며($t=13.398$, $p=.01$), 관

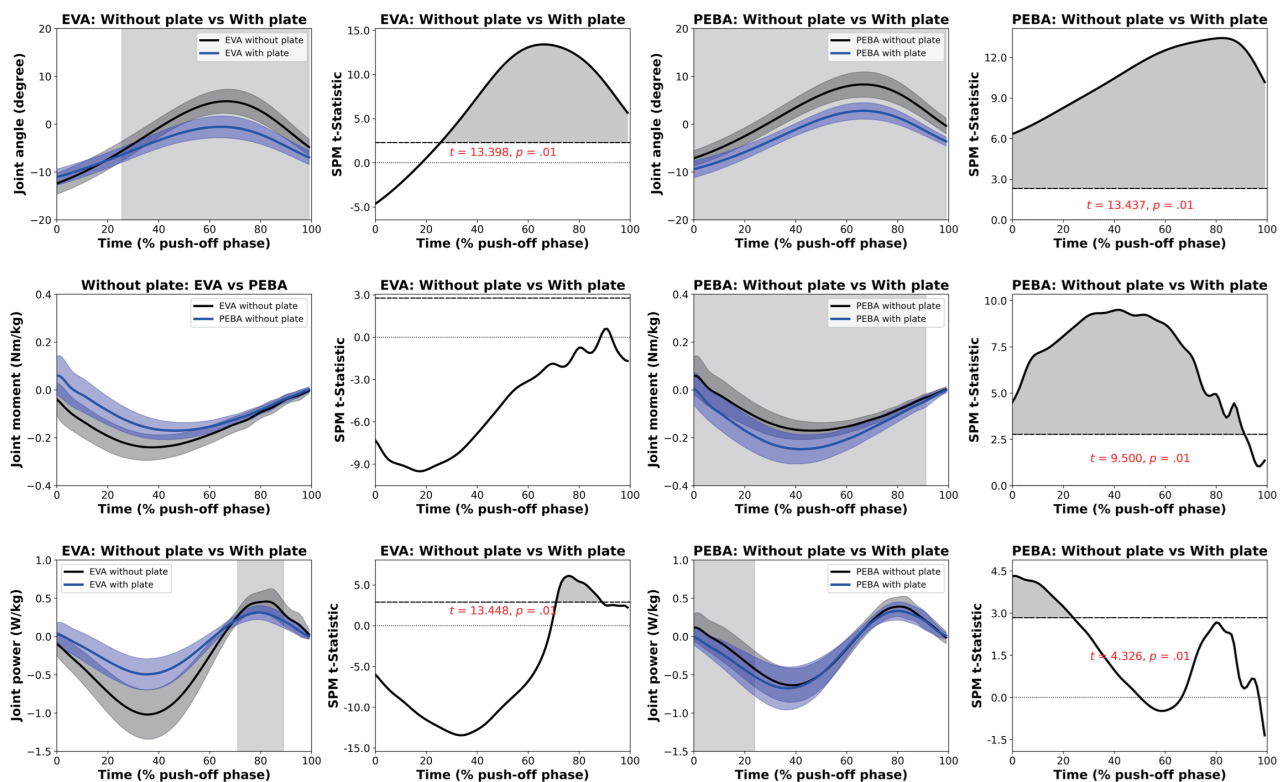
절 파워는 71.0-89.0%에서 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다($t=13.448$, $p=.01$). 또한, push-off 시간($W=662.00$, $p=.01$)과 최대 추진력($W=1492.00$, $p=.03$), 관절 파워 전환 타이밍($W=273.00$, $p=.01$)이 통계적으로 유의한 차이가 나타났다.

반면, PEBA 소재의 플레이트 유무에 따른 차이는 관절 각도($t=13.437$, $p=.01$)가 push-off 구간의 0.0-99.0%에서 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며, 관절 모멘트($t=9.500$, $p=.01$)와 관절 파워($t=4.326$, $p=.01$)는 각각 0.0-91.1%와 0.0-23.9%에서 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 또한, push-off 시간에서도 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다($W=686.00$, $p=.01$).

Table 4. Spatiotemporal and ground reaction force variables by carbon fiber plate condition

(M±SD)

Variables (unit)	EVA				PEBA			
	without plate	with plate	<i>W</i>	<i>p</i>	without plate	with plate	<i>W</i>	<i>p</i>
Push off time (ms)	98.17±7.95	94.67±8.80	662.00	.01*	97.33±9.60	100.5±7.83	686.00	.01*
Peak impact force (/BW)	1.88±0.43	1.84±0.42	1981.00	.79	1.88±0.29	1.91±0.42	1991.00	.82
Peak propulsion force (/BW)	0.37±0.05	0.35±0.05	1492.00	.03*	0.36±0.05	0.35±0.05	1876.00	.49
Timing of joint power transition (% push off phase)	66.87±2.23	63.63±3.69	273.00	.01*	66.84±3.50	66.17±2.31	1536.00	.35

* $p < .05$ **Fig. 3.** Time-continuous biomechanical analysis by carbon fiber plate condition (angle and moment: + dorsiflexion, - plantarflexion; power: + positive, - negative)

논 의

본 연구는 러닝화 제작 시 사용되는 미드솔의 소재에 따른 카본 플레이트의 삽입 효과의 생체역학적 차이를 검증하기 위해 수행되었다.

먼저, 플레이트가 없는 조건에서 EVA와 PEBA 간 차이는 나타나지 않았다. 선행 연구에 따르면, 달리기 시 발가락의 롤 오프(roll-off) 과정과 관절 모멘트 및 파워는 신발의 종방향 굽힘 강성에 따라 달라진다고 보고되어왔다(Roy & Stefanyshyn, 2006; Willwacher et al., 2013). 본 연구에서도 마찬가지로 구조물의 삽입이나 강성 변

화 없이 미드솔 소재의 완충 또는 반발 특성의 차이만으로는 MTP 관절의 움직임이나 에너지 전이(transfer)에 직접적인 변화를 유발하지 못하는 것으로 판단된다. 더불어 본 연구는 러너의 개인적 특성과 근력 수준, 주행 스타일 등 다양한 복합적 요인을 통제하지 않았다는 점에서 미드솔 자체의 특성에 따른 차이를 상쇄시켰을 가능성이 있을 것으로 사료된다(Nigg & Wakeling, 2001).

반면, 플레이트 삽입 효과는 두 소재 간에 뚜렷한 차이가 나타났다. EVA 소재에 플레이트를 추가한 경우 플레이트가 없는 조건에 비해 MTP 관절의 가동범위가 제한되고 양의 파워가 감소하였으며, push-

off 시간 단축과 MTP 관절파워 전환 타이밍의 조기 발생, 최대 전방 추진력의 감소가 나타났다. 이는 push-off 구간에서 MTP 관절의 배측굴곡이 충분히 이루어지기 전에 빠르게 지면에서 발을 분리하려는 움직임을 수행하는 것을 의미한다. Willwacher et al. (2013)의 연구에서 전족부의 제한된 배측 굴곡이 롤 오프 과정을 앞당긴다고 보고한 바와 같이, 플레이트 삽입으로 인한 탄성 반발(recoil) 기능이 충분히 활용되지 못하고 빠른 추진 타이밍을 선택하는 보상적 전략을 수행하는 것으로 판단된다(Roy & Stefanyshyn, 2006). 따라서, 쿠셔닝이 높은 EVA 소재의 미드솔과 플레이트의 결합은 단거리 주행 또는 짧은 스프린트 상황에서 빠른 스텝 빈도를 유지함으로써 신속한 턴 오버(turn over)와 가속성을 높이는데 유리할 가능성이 있지만(Onodera et al., 2017), 추진력의 이득은 제한적인 것으로 추정된다. 또한 장거리나 중·저속 페이스 상황에서는 MTP 관절의 능동적 기여가 감소하기 때문에 에너지 효율이 낮아질 수 있으며, 장시간 주행 시 발목·무릎 등 다른 관절에서 보상작용을 일으켜 신체에 더 큰 부하가 가해질 가능성을 고려해야 한다(Roy & Stefanyshyn, 2006).

PEBA 소재에 플레이트를 삽입한 조건에서는 플레이트가 없는 조건에 비해 MTP 관절의 가동 범위가 제한되었지만, 오히려 push-off 시간이 길어지는 결과가 나타났다. 또한, push-off 동안 MTP 관절의 저축 굴곡 모멘트와 음의 파워가 증가하였으며, 이를 통해 MTP 관절이 더 많은 에너지를 흡수하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Willwacher et al. (2014)의 연구에서 보고된 바와 같이, 미드솔에 플레이트를 삽입하여 종방향 강성을 증가시킬 경우 발 내부의 변형과 에너지 흡수에 기여할 수 있다는 주장과 일치한다. 또한, Nigg & Wakeling (2001)는 더 긴 시간 동안 충격 흡수와 에너지 분산 작용을 수행하는 경우, 관절의 피로를 경감시키는 데 유리하게 작용할 수 있다고 보고하였다. 한편 본 연구에서 MTP 관절의 양의 파워는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 PEBA와 같이 본래 탄성이 뛰어난 소재에 플레이트가 삽입되었을 때 미드솔의 강성이 더욱 증가하게 되며, 이때 흡수된 에너지가 추진력으로 충분히 전환되지 않을 수 있음을 의미한다(Rodrigo-Carranza et al., 2024). 다시 말해, 신발의 종방향 강성이 과도하게 증가할 경우 에너지 저장-반환 메커니즘이 단시간 내에 활성화되지 않을 수 있으며(Cigoja et al., 2022), 결과적으로 러닝 경제성 향상으로 이어지지 않을 가능성을 시사한다. 반면, Sanno et al. (2020)는 높은 탄성의 신발 착용은 반복적인 에너지 흡수 메커니즘을 유발하게 되며, 이때 지나치게 편심성 근 수축 작용에 의존하게 될 경우 저축 굴곡근(plantar flexor)의 부하 증가 및 근 피로 누적을 야기할 수 있다고 보고하였다. 따라서, PEBA와 플레이트의 조합은 장거리 주행 시 충격 흡수에는 유리할 수 있지만, 반복적인 추진 동작이나 단시간 내 강한 추진력이 요구되는 고속주행 및 스프린트를 수행 시 근 피로 누적 가능성이 있을 것으로 판단된다.

다음으로 플레이트가 있는 조건에서 두 소재 간 차이를 비교한 결과, 구조적 삽입물을 통해 증가한 강성과 미드솔 소재의 특성에 따라 발 내부의 에너지 처리 방식과 시간적 반응 특성에서 차이가 나타났다. 구체적으로, 플레이트를 삽입한 조건에서 PEBA는 EVA보다 push-off 구간동안 MTP 관절의 저축굴곡 모멘트와 음의 파워가 유의하게 증가하였으나, 양의 파워는 두 소재간 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 앞서 논의한 것들과 같이, 고반발 특성을 지닌 PEBA 소재에 플레이트가 삽입되면서 증가한 강성이 더 많은 에너지를 흡수 및 저장하고 이를 분산하는 기전으로 작용했음을 시사한다(Willwacher et al., 2014). 또한, 플레이트를 삽입한 조건에서

두 소재는 시간적 반응 특성에서도 차이를 보였다. PEBA는 EVA보다 push-off를 더 긴 시간 동안 수행하였으며, MTP 관절 파워 전환 타이밍이 지연되었다. 이러한 결과는 두 소재에서 플레이트 삽입 효과가 다르게 나타남을 의미한다. 실제로 PEBA는 플레이트 삽입 시 push-off 시간이 증가하였지만, MTP 관절 파워 전환 타이밍은 차이가 나타나지 않았다. 반면, EVA는 플레이트 삽입 후 push-off 시간이 단축되고, MTP 관절 파워 타이밍이 더 빠르게 나타났다. 이러한 결과는 플레이트 삽입 조건에서 나타난 두 소재 간 시간적 반응 특성이 PEBA 고유의 특성 때문이라기보다, EVA가 플레이트와 결합될 경우 나타나는 빠른 롤 오프 반응에 기인한 보상 전략의 일환으로 판단된다(Willwacher et al., 2013). 따라서, 본 연구의 결과는 PEBA와 플레이트의 결합은 EVA와 플레이트의 결합 조건보다 장거리 주행 시 더 긴 시간 동안 발의 충격 흡수와 에너지 분산을 수행하여 관절의 피로를 경감시키는 데 유리하게 작용할 수 있지만(Nigg & Wakeling, 2001), 단거리나 빠른 가속 상황과 같이 즉각적인 추진력이 요구되는 상황에서 큰 피로를 유발할 가능성이 있다(Sanno et al., 2020).

위의 결과들은 미드솔 소재에 따른 플레이트의 삽입이 MTP 관절의 에너지 저장-분산 메커니즘 및 시간적 반응 전략에 복합적으로 영향을 미치며, 단순히 미드솔의 소재를 변경하는 것만으로는 나타나지 않는 생체역학적 특성의 차이를 유발할 수 있음을 시사한다. 따라서, 러닝화 설계 시 주행 목적에 맞춰 미드솔 소재와 플레이트 삽입 여부를 종합적으로 고려하는 것을 제안하며, 이를 통해 러닝 경제성 향상과 근골격계 부하를 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.

결론

본 연구는 러닝화 미드솔 소재와 카본 플레이트 삽입에 따른 MTP 관절의 생체역학적 차이를 규명하기 위하여, MTP 관절의 시간-연속적 움직임과 시간 및 지면반력 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

미드솔 소재의 변화만으로는 MTP 관절 움직임에 유의한 영향을 미치지 못하였으나, 플레이트 삽입 시 EVA와 PEBA의 조합에 따라 서로 다른 에너지 처리 전략이 나타났다. EVA에 플레이트를 추가하는 경우 지면과 발의 빠른 분리를 유도하여 단거리 가속환경에서 유리하게 작용할 가능성이 있다. 반면, PEBA에 플레이트를 추가하는 경우 더 많은 에너지 흡수와 분산이 이루어져 장기간 주행 시 관절 피로를 경감하는 데 기여할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 미드솔 소재와 카본 플레이트의 상호작용은 달리기 시 MTP 관절의 생체역학적 특성에 복합적인 영향을 미치므로, 러닝화 구조 설계 시 미드솔 소재와 카본 플레이트의 조합에 대한 전략적 고려가 필요함을 시사한다.

하지만 본 연구는 10명의 피험자를 대상으로 수행되었으며, 개별적인 특성(주행 스타일, 근력 수준 등)을 통제하지 못하였다는 점에서 본 연구결과를 일반화하는 데 한계가 있다. 또한, 대사 관련 지표(metabolic measures)를 측정하지 않았기 때문에, 각 신발 조건에서 나타난 생체역학적 변화가 러닝 경제성에 미치는 영향에 대한 실증적 검증은 수행되지 않았다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 미드솔 소재 및 플레이트 삽입 유무에 따른 MTP 관절의 기계적 반응에 대한 차이를 정량적으로 규명하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 생리학 및 생체역학적 반응을 통합적으로 고려한 연구 설계에 활용될 수 있는 실증적 기반을 제공한다.

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: J. L., S. H.; Data curation: S. -J. H., J. L., S. H.; Formal analysis: S. -J. H., J. L.; Funding acquisition: J. P.; Methodology: S. -J. H., J. L.; Project administration: J. P.; Visualization: S. -J. H.; Writing-original draft: S. -J. H.; Writing-review & editing: S. -J. H., J. P.

참고문헌

- Chang, B., Kashcheev, A., Veksha, A., Lisak, G., Goei, R., Leong, K., Tok, A., & Lipik, V. (2023). Nanocomposite Foams with Balanced Mechanical Properties and Energy Return from EVA and CNT for the Midsole of Sports Footwear Application. *Polymers*, 15(4), 948.
- Cigoja, S., Fletcher, J. R., & Nigg, B. M. (2022). Can changes in midsole bending stiffness of shoes affect the onset of joint work redistribution during a prolonged run? *Journal of Sport and Health Science*, 11(3), 293-302.
- Day, E. M., & Hahn, M. E. (2019). Dynamic angular stiffness about the metatarsophalangeal joint increases with running speed. *Human Movement Science*, 67, 102501.
- Deleu, P. A. (2019). *Ankle osteoarthritis and its treatments: impact on foot and ankle biomechanics*. Doctoral dissertation, Université de Lyon.
- Drillis, R., Contini, R., & Bluestein, M. (1964). Body segment parameters. *Artificial limbs*, 8(1), 44-66.
- Ghanbari, A., Fletcher, J. R., Bradshaw, A., & Nigg, B. M. (2025). Effects of the curved carbon fibre plate and PEBA foam on the energy cost of running and muscle activation. *Footwear Science*, 1-10.
- Hoogkamer, W., Kipp, S., & Kram, R. (2019). The biomechanics of competitive male runners in three marathon racing shoes: A randomized crossover study. *Sports Medicine*, 49(1), 133-143.
- Isherwood, J., Woo, S., Cho, M., Cha, M., Park, S., Kim, S., Han, S., Jun, J., Sung, N., & Sterzing, T. (2024). Advanced footwear technology and its impacts on running mechanics, running economy and perception of male and female recreational runners. *Footwear Science*, 16(3), 179-189.
- Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., Daoud, A. I., D'andrea, S., Davis, I. S., Mang'Eni, R. E., & Pitsiladis, Y. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 463(7280), 531-535.
- Lin, S., Song, Y., Cen, X., Bálint, K., Fekete, G., & Sun, D. (2022). The implications of sports biomechanics studies on the research and development of running shoes: A systematic review. *Bioengineering*, 9(10), 497.
- Malisoux, L., Delattre, N., Urhausen, A., & Theisen, D. (2017). Shoe cushioning, body mass and running biomechanics as risk factors for running injury: A study protocol for a randomised controlled trial. *BMJ Open*, 7(8), e017379.
- Matsumoto, Y., Ogihara, N., Hanawa, H., Kokubun, T., & Kanemura, N. (2022). Novel multi-segment foot model incorporating plantar aponeurosis for detailed kinematic and kinetic analyses of the foot with application to gait studies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 894731.
- Matties, J. R. (2024). *Biomechanical and energetic trends in response to 8 weeks of training in advanced footwear technology*. Master's thesis. California State University, East Bay.
- Nigg, B. M., & Wakeling, J. M. (2001). Impact forces and muscle tuning: A new paradigm. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 29(1), 37-41.
- Onodera, A. N., Neto, W. P. G., Roveri, M. I., Oliveira, W. R., & Sacco, I. C. (2017). Immediate effects of EVA midsole resilience and upper shoe structure on running biomechanics: A machine learning approach. *PeerJ*, 5, e3026.
- Pataky, T. C. (2012). One-dimensional statistical parametric mapping in Python. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 15(3), 295-301.
- Perry, D., Lino, H., Bertschy, M., & Hoogkamer, W. (2024). Effects of longitudinal bending stiffness and midsole foam on running energetics. *Footwear Science*, 1-7.
- Rodrigo-Carranza, V., Hoogkamer, W., González-Ravé, J. M., Horta-Muñoz, S., Serna-Moreno, M. D. C., Romero-Gutierrez, A., & González-Mohino, F. (2024). Influence of different midsole foam in advanced footwear technology use on running economy and biomechanics in trained runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 34(1), e14526.
- Roy, J. P. R., & Stefanyshyn, D. J. (2006). Shoe midsole longitudinal bending stiffness and running economy, joint energy, and EMG. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(3), 562-569.
- Sanno, M., Epro, G., & Brüggemann, G. P. (2020). Running into fatigue: The effects of footwear on kinematics, kinetics, and energetics. *Footwear Science*, 12(2), 123-132.
- Stefanyshyn, D. J., & Nigg, B. M. (2000). Influence of midsole bending stiffness on joint energy and jump height performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(2), 471-476.
- Subramaniam, A. (2024). *Effects of advanced footwear technology on running mechanics and performance*. Doctoral dissertation, PRISM Repository, University of Calgary.
- Verdel, N., Nograšek, N., Drobnič, M., Papuga, I., Strojnik, V., & Supej, M. (2024, July). Measuring calcaneus eversion angle during running at different speeds and inclinations: A 3D kinematics approach. In *2024 IEEE International Workshop on Sport, Technology and Research (STAR)* (pp. 171-175). IEEE.
- Wang, J., & Wang, X. (2022). A review of research on shock absorbing sports soles. In *Proceedings of the 8th International Conference on Biotechnology and Biomedicine (ICBB 2022)* (pp. 245-252). Science and Technology Publications.
- Willwacher, S., König, M., Braunstein, B., Goldmann, J. P., & Brüggemann, G. P. (2014). The gearing function of running shoe longitudinal bending stiffness. *Gait & Posture*, 40(3), 386-390.
- Willwacher, S., König, M., Potthast, W., & Brüggemann, G. P. (2013). Does specific footwear facilitate energy storage and return at the metatarsophalangeal joint in running? *Journal of Applied Biomechanics*, 29(5), 583-592.
- Xu, L., Wang, Y., & Wen, X. (2025). The role of footwear in improving running economy: A systematic review with meta-analysis of controlled trials. *Scientific Reports*, 15(1), 3963.

러닝화의 미드솔 소재와 플레이트 삽입에 따른 생체역학적 차이 분석

한수지¹, 이주성², 한상혁², 박종철³

¹국립부경대학교 산학협력단, 연구교수

²데상트 신발 R&D 센터, 연구원

³국립부경대학교 스마트헬스케어학부, 부교수

[목적] 본 연구의 목적은 러닝화의 미드솔 소재(EVA, PEBA)와 카본 플레이트 삽입에 따른 생체역학적 차이를 규명하는 데 있다.

[방법] 연구대상자는 10명의 달리기 동호인으로 선정하였다. 연구 대상자는 12m 주로에서 $3.89\text{m/s} \pm 5\%$ 의 주행 속도로 달리기를 수행하였으며, 시간-연속적인 MTP 관절 움직임(각도, 모멘트, 파워) 및 이산형 변수(푸시오프 시간, 최대 수직 충격력, 최대 전방 추진력, 관절 파워의 전환 타이밍)를 분석하였다. 수집된 데이터는 시간 연속 통계적 매개변수 매핑(SPM) 분석과 Wilcoxon 부호 순위 검정을 사용하여 비교하였다($\alpha=.05$).

[결과] 플레이트가 없는 조건과 비교했을 때, 플레이트를 삽입한 EVA는 푸시오프 시간과 MTP 관절의 가동범위, 양의 파워 및 최대 전방 추진력이 감소하였으며, MTP 관절파워의 전환 타이밍이 빠르게 나타났다($p<.05$). 반면, 플레이트를 삽입한 PEBA는 MTP 관절의 가동범위가 감소하였지만, 저축굴곡 모멘트가 감소하고 음의 파워와 푸시오프 시간이 증가하였다($p<.05$). 또한 플레이트가 있는 조건에서 PEBA는 EVA에 비해 MTP 관절의 저축굴곡 모멘트와 음의 관절 파워, 푸시오프 시간이 증가하였으며, 관절 파워의 전환 타이밍이 지연되는 것으로 나타났다($p<.05$).

[결론] 본 연구의 결과는 미드솔 소재와 플레이트 간의 상호 작용에 따라 MTP 관절의 에너지 처리 전략에 복잡한 변화가 나타남을 의미한다. 구체적으로, 플레이트가 있는 EVA는 빠른 롤 오프 과정을 통해 신속한 턴 오버를 유도하여 가속성을 향상시킬 수 있으며, 플레이트가 있는 PEBA는 장기간 에너지 흡수를 촉진하여 장거리 달리기 중 관절 피로를 최소화하는데 잠재적으로 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어

미드솔 소재, 카본 플레이트, 다분절 발 모델, 통계적 파라메트릭 매핑, 첨단 신발 기술