

Analysis of Domestic and International Biomechanics Research Trends in Shoes: Focusing on Research Published in 2015-2019

신발 분야 국내외 운동역학 연구동향 분석: 2015-2019년에 발간된 연구를 중심으로

Heeyoung Back¹, Kyungock Yi¹, Jusung Lee², Jieung Kim³, Jeheon Moon⁴

¹Division of Kinesiology & Sports Studies, College of Science and Industry Convergence, Ehwa Womans University, Seoul, South Korea

²Department of sport science, Kangwon National University, Kangwon, South Korea

³Department of Physical Education, Sangmyung University, Seoul, South Korea

⁴Department of Sport Science, Korea Institute of Sport Science, Seoul, South Korea

Received : 24 March 2020

Revised : 27 April 2020

Accepted : 11 June 2020

Objective: The purpose of this study was to identify recent domestic and international research trends regarding shoes carried out in biomechanics field and to suggest the direction of shoe research later.

Method: To achieve this goal of research, the Web of Science, Scopus, PubMed, Korea Education and Research Information Service and Korean Citation Index were searched to identify trends in 64 domestic and international research. Also, classified into the interaction of the human body, usability evaluation of functional shoes, smart shoe development research, and suggested the following are the suggestions for future research directions.

Conclusion: A study for the coordination of muscle activity, control of motion and prevention of injury should be sought by developing shoes of eco-friendly materials, and scientific evidence such as physical aspects, materials, floor shapes and friction should be supported. Second, a study on elite athletes in various sports is needed based on functional shoes using new materials to improve their performance along with cooperation in muscle activities and prevention of injury. Third, various information and energy production are possible in real time through human behavioral information, and the application of Human Machine Interface (HMI) technology through shoe-sensor-human interaction should be explored.

Keywords: Shoe structure, Functional shoes, Smart shoes, Research trends

Corresponding Author

Jeheon Moon

Department of Sport Science,
Korea Institute of Sport Science,
727 Hwarang-ro, Nowon-gu,
Seoul, 01794, South Korea
Tel : +82-2-970-9544
Fax : +82-2-970-9686
Email : jhmoon@kspo.or.kr

INTRODUCTION

신발의 고유한 기능은 지면으로부터 작용하는 충격을 완화시키고 열기나 냉기 등의 외부 환경으로 인한 손상으로부터 발을 보호하기 위해 개발되어 왔다(Park & Park, 2015). 오늘날에는 모든 사람들이 신발을 신고 걷는 것이 일반화되었으며, 걷기와 달리기와 같은 활동 시 더욱 안전하고 편리함을 위하

여 기능성 신발을 개발하였다(Song, Lee & Sung, 2008). 신체의 직립 자세를 유지하고 균형을 잡아 안정성을 확보해주는 하지 근육은 지면의 상태에 따라 그 활성도가 지속적으로 변하게 된다. 또한, 발이 체중을 지지하는 기준으로 보면 신체 중심이 뒤쪽으로 넘어질 때 체중의 75%는 뒤꿈치에, 25%는 중족골에 두는 것이 발바닥의 아치를 유지시켜 하지 근육의 휴식을 유도하고 발의 피로를 최소화할 수 있다(Shin, Lee, Kim & Park,

2007). 이와 같은 맥락에서 상대적으로 앞굽을 높임으로서 인체 중심을 뒤쪽으로 하여 인체의 자세를 올바르게 유지 또는 개선하기 위해서 다양한 신발이 개발되었다(Kim & Chae, 2007).

족부는 외부와 유일하게 상호작용하는 부분으로 하지와 지면 사이의 중요한 역학적 역할을 하는 다관절 메커니즘을 가지고 있으며, 족부의 구조는 하지관절의 부상이나 뼈, 근육, 인대 등에 많은 영향을 미치고 퇴화와 불안정, 운동장애 등의 원인이 될 수 있다(Yeo, Lee & Lee, 2006). 특히, 보행 시 고관절과 무릎, 그리고 발목관절에 이르는 다양한 자유도에 대해 운동학적, 운동역학적으로 특징을 분석하는 것은 족부 질환에 대한 임상적 평가에 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 족부와 지면과의 상호작용을 생체역학적 관점에서 고찰하는 중요한 목적이 되기도 한다(Landorf & Keenan, 2002). Nigg (1986)는 보행 시 충격력은 체중의 1~2배, 달릴 때는 2~3배에 달한다고 하였으며, 특히 충격력과 관련된 과부하에 대한 새로운 패러다임은 근육 튜닝과 부드러운 근육진동과 관련된 충격력 등이 대표적인 예라 할 수 있다(Park, 2006). 이에 관련된 신발 조건과 발의 건강의 관계를 규정하는 생체역학에 관련된 연구들이 많이 수행되었다(Byun, 2010).

이전의 신발 연구에서는 발과 보행의 역학적인 움직임이 주를 이루었다면, 현재는 기능성 신발의 연구들이 주로 다루어졌다. 기능성 신발 연구는 1950년대 독일에서 우수한 성능의 축구화를 개발하려는 노력으로 시작되었고, 이후 축구화뿐만 아니라 다른 스포츠에서 러닝화, 훈련용 운동화에 대한 기술 개발이 이루어졌다. 이후 70년대에 들면서 기능성 신발의 개발을 위하여 고속카메라를 사용하여 과학적 신발 개발을 위하여 노력하였으며(Nam, Lee & Kim, 2015), 기능성 신발과 일반 신발을 신었을 때 유의한 차이가 나는 변인으로는 주요 국면별 착지각, 후족각, 아킬레스건각, 발목각의 변화량과 변화율을 분석하였다(Choi, 2003). 또한, 고령화 사회로 접어들면서 퇴행성관절염과 골질량 등을 예방하기 위한 기능성 신발을 개발하여 미국 식약청에 의약품 보조기구로 등록된 사례도 있다(Park, Kim & Joo, 2006).

최근 국내 신발은 산업은 정보통신기술(ICT)과 협업하여 센서가 삽입된 스마트 인솔을 개발함으로써 사용자의 걸음걸이나 보폭, 균형, 활동량, 압력 분포 등 각종 데이터를 수집하고 분석해 모바일로 전송하는 사물인터넷 기능을 포함하고 있다. 국외에서도 신발에 센서를 삽입하여 획득한 생체신호와 인공지능 기술을 결합해 실시간으로 하지의 움직임을 인식한 후 러닝 자세를 지도해주거나 건강상태를 확인해주는 연구들이 많아지고 있다(Kim, 2015).

따라서 본 연구는 최근 운동역학 분야에서 수행한 신발 관련 국내외 연구동향을 파악하여 추후 신발 연구의 방향을 제시하는데 있다. 더 나아가 이 연구를 통하여 일부 주제에 편향성을 지양하고 앞으로 발전될 분야를 살펴 논문이 질적, 양적

으로 발전할 수 있는 토대를 마련하고자 한다.

이러한 목적 달성을 위한 신발 연구의 학술연구 동향을 살펴보기 위해 국내외 대표적인 학술연구 데이터베이스인 Web of Science, Scopus, PubMed, 한국교육학술정보원(KERIS), 한국학술지 인용색인(KCI)에서 연구 검색 기능을 사용하였다. 먼저, 학술연구 제목에 shoes & footwear engineering, shoes & footwear biomechanics, shoes & footwear IT, 신발, 공학, 신발 역학을 입력하여 총 358편의 연구가 검색되었다. 이후 인솔(insole), 설계, 디자인, 제조 키워드를 제외한 결과 232편이 검색되었으며, 2010년 이후 연구는 142편이 검색되었다. 마지막으로 2015년을 기준으로 운동역학 분야의 관련 키워드인 kinematic, kinetic, sensor, wearable, smart, 3D로 검색 결과 국내 21편, 국외 43편의 학술연구로 축소해 이를 분석에 사용하였다. 검색을 통해 분류된 연구는 운동학, 운동역학, 공학의 분야에서 신발을 주제로 연구된 것으로 크게 신발 구조와 인체의 상호작용, 기능성 신발의 사용성 평가, 스마트 신발 개발 연구로 나누어졌다. 세부적으로 '신발 구조와 인체의 상호작용'을 다룬 연구는 국내 3편, 국외 18편이고, '기능성 신발의 사용성 평가'를 다룬 연구는 국내 11편, 국외 13편이었으며, '스마트 신발 개발' 연구는 국내 7편, 국외 12편으로 분류되어 연구를 진행하였다.

RESEARCH TRENDS IN SHOES

1. 신발 구조와 인체의 상호작용

신발은 발을 일차적으로 보호하고 걷거나 달리기와 같은 동작 시 착지에 따른 충격력을 흡수하여 발목을 포함한 인체 여러 관절의 부상을 예방하는 역할을 한다(Song et al., 2008). 또한, 발의 위치와 구조에 영향을 미치며, 이러한 변화는 신체 기능에 영향을 줄 수 있다(Franklin, Grey, Heneghan, Bowen & Li, 2015). 따라서, 신발의 개발과 동시에 인체에 작용하는 여러 분석변인들의 분석을 통하여 상해 발생과 같은 안정성 평가 등이 이루어져야 한다(Kwak & Yoon, 2017).

Kim과 Park (2016)은 불안정성 신발 착용 후 앉은 자세에서 일어서기 동작을 실시한 후 하지관절의 운동형상학 및 운동역학적인 변화를 알아보기 위해 3차원 동작 분석시스템을 활용하였다. 결과를 통해 불안정성 신발 착용이 엉덩관절 앞쪽 통증 환자와 무릎관절염 환자들에게 통증을 줄여줄 수 있다는 것과 발목관절의 불안정성, 근력 약화가 있는 환자들의 안정성 강화 훈련의 치료 중재 도구의 가능성을 제시할 수 있다고 보고하였다. Sayer 등(2019)은 안정화와 중성 스타일의 운동화가 무릎관절의 최대 굴곡 모멘트에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 두 신발 모두 엉덩이, 무릎 및 발목관절의 운동학적 변인을 증가시켰으며, 맨발에 비해 무릎관절의 최대 굴곡 모

멘트를 증가시킨다고 보고하였다. 이후 무릎관절의 최대 굴곡 모멘트 및 슬개 대퇴부 통증의 잠재적 위험을 막기 위해 무릎과 지면반력과 모멘트의 거리를 줄이기 위해 신발의 특성을 조작하는 것을 고려해 봐야 한다고 하였다. Nam, Moon & Choi (2016)는 20세 이상 성인의 구두 굽 높이에 따른 균형과 보행형태의 변화에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과, 맨발, 3 cm, 7 cm 굽 높이의 구두를 착용한 그룹에서 굽 높이가 높아짐에 따라 좌-우 거리는 감소하였고, 전-후거리는 증가하였으며, 소요시간이 증가하였고, 균형능력 점수는 감소하여 모두 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 결론적으로 신발의 굽 높이가 높을수록 균형 조절능력이 감소하였으며 힐의 높이가 보행의 균형 능력을 감소시킬 수 있다는 결과를 제시하였다.

신발 쿠션(두께) 조건에 따른 지면반력 패턴을 비교 분석한 연구도 진행되었는데 맨발, 최소 두께 바닥, 얇은 바닥, 두꺼운 바닥 4개의 조건에서 4 m/s와 7 m/s의 힘 측정 러닝머신을 이용해 보행 시 수직 지면반력 패턴을 비교하였다. 결론적으로 신발 조건에 따른 지면반력과 시간 패턴을 예측할 수 있었으며, 달리기 선수는 발목의 각도를 변경함으로써 충격 지속 시간을 조절하여 하중의 비율을 유지하기 한다는 사실을 입증하였다. 이 방법을 통해 신발의 기능 평가에 대한 인체의 상호작용에 대한 실험의 유효성을 주장하였다(Udofa, Clark, Ryan & Weyand, 2019). Langley, Cramp & Morrison (2019)은 일반화, 쿠션형 운동화를 착용한 후 하체의 운동학적 측면에 어떻게 영향을 미치는 지에 대한 연구를 진행하였다. 그 결과 신발 조건 간에 초기 접촉과 toe-off 시 발목과 무릎관절의 유의한 차이를 보였다고 하였으며, 결과를 토대로 발목관절의 외번을 줄여 부상 위험을 줄이기 위한 동작 제어 운동화 제작에 기초 자료를 제공하였다. 발의 중족골은 달리기 자세 단계에서 나타나는 큰 변형으로 인해 스트레스 골절에 특히 취약하다. 따라서, 신발 쿠션과 보폭 감소는 중족골 변형을 줄여 스트레스 골절 위험을 줄이기 위한 두 가지 잠재적 개입을 나타낸다(Firminger, Fung, Loundagin & Edwards, 2017). 반면에, 과도한 쿠션이 충격력과 충격 부하율을 증가시켜 오히려 부상을 야기시킬 수 있다는 연구 결과도 있다(Kulmala, Kosonen, Nurminen & Avela, 2018).

보행 중 운동형상학 및 운동역학적 반응은 신발의 조건에 따라 다르다(Dames & Smith, 2016). Langley, Cramp & Morrison (2018)은 달리기의 자세 단계 전체에 걸쳐 분절 간 발 움직임에서 다양한 유형의 러닝 슈즈가 미치는 영향에 대한 새로운 통찰력을 제공하였다. 중족-후족, 전족-후족, 전족-중족 및 내측 종 아치 움직임과 관련된 개별 매개 변수를 신발 조건 간에 비교한 결과, 초기 접촉 시 중족-후족과 최대 내측 종 방향 아치 각도는 중립 및 쿠션 신발에 비해 운동화에서 현저히 낮았다고 보고하였다. 이처럼 운동 제어 러닝 슈즈에서 내측 종 방향 아치 변형의 감소는 슈즈의 내측 포스팅 및 비틀림 제어

시스템의 증가에 기인할 수 있으며, 향후 부상 위험에 대한 발 분절의 운동학에서 이러한 작은 변화가 미치는 영향을 결정하기 위해 필요하다. Fuller, Bellenger, Thewlis, Tsiros & Buckley (2015)는 신발이 서로 다른 조건을 비교하거나 신발과 맨발을 비교하는 통제된 실험들을 메타 분석을 통해 검토함으로써 운동화가 달리기 수행력 및 효율적인 러닝(러닝 이코노미)에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 신발 질량과 달리기 대사 효율 사이의 유의미한 연관성을 확인하였다. 결론적으로 신발 조건과 신발의 특정 모델의 특성이 효율적 러닝을 개선할 수 있으며, 향후 신발의 기능에 대한 수행력의 측정값들에 대한 연구의 필요성을 제기하였다. Franklin 등(2015)은 보행에 대한 신발의 영향, 특히 맨발로 걷기와 일반적인 신발 사이에서 운동학 및 근육 활동 평가에 중점을 두고 연구하였다. 그 결과 신발은 특히 보행의 운동학 및 운동역학에 급성 및 만성적으로 영향을 미친다고 보고하였으며, 향후 50세 이상의 노인을 대상으로 연령에 따른 추가 연구가 필요하다고 하였다. Wegener 등(2015)은 걷기와 달리기 동작에서 추진하는 동안 운동화가 어린이의 다중 분절 발 운동학에 미치는 영향을 연구하여 걷기 동작의 추진 시 36.0°에서 10.7°로, 달리 동작에서는 31.5°에서 12.6°로 제1중족골 관절 운동을 감소시켰다고 보고하였다. 또한, 걷기 및 달리기 추진 중에 어린이 운동화는 제1중족골 관절 및 중족부 운동에 부목 효과를 나타내 달리는 동안 발목관절의 족저굴곡의 증가로 부분적으로 보상된다고 하였다. Hutchison, Scharfbillig, Uden & Bishop (2015)은 러닝과 보행 자세 단계 동안 무릎관절의 횡단면 회전에 대한 신발의 즉각적인 영향을 결정하는 것을 목적으로 연구를 진행하였다. 그 결과 하중 반응 중 횡단면 무릎 ROM을 제외한 내/외부 회전 관절 각도 등에서 주요 영향이 관찰되었다고 보고하였다. 결론적으로 안정성 신발은 다른 조건의 신발보다 러닝의 단계 자세 전반에 걸쳐 무릎 내회전의 최대값을 감소시켰다고 하였다. Fredericks 등(2015)은 일반화, 맨발, 미니멀리스트를 착용하고 다양한 속도의 달리가 발 착지 패턴, 보폭 길이, 무릎 및 발목 각도에 미치는 영향을 비교하는 연구를 진행하였다. 그 결과 신발 유형과 속도는 착지 시 발목 각도에 크게 영향을 미쳤으며, 특히 맨발과 미니멀리스트 착용 후 달리기 동작에서 착지 시 더 큰 족저굴곡을 나타냈다고 하였다. 또한, 속도와 신발 조건은 발목 각도(발 착지 시 굴곡이 커짐)를 예측하며 미니멀리스트 러너의 부상 위험에 영향을 줄 수 있다고 하면서 다양한 속도와 적응을 활용한 연구가 필요하다고 보고하였다.

한편, Hoerzer, Federolf, Maurer, Baltich & Nigg (2015)은 신발이 운동의 신경 근육 조절을 향상시킬 수 있다고 제안했다. 신발과 같은 외부 경계 조건으로 인한 보행 비대칭 변화를 감지할 수 있는 포괄적인 비대칭 지수(CAI)를 개발하고, (b) 신발이 보행 비대칭에 영향을 미치는지 여부를 조사하였다. 연구를

Table 1. Mainly study trends on the interaction between shoe structure and human body

Author (year)	Purpose	Participants	Equipment	Main results
Fredericks et al. (2015)	Traditional, barefoot, and minimalist compare	Recreational runners	3D mocap	Speed and footwear predict implications for minimalist runners and their risk of injury
Fuller et al. (2015)	To investigate the effect of footwear on running performance and running economy	Previous study	Meta-analysis	Certain models of footwear and footwear characteristics can improve running economy
Hutchison et al. (2015)	To determine the immediate effects of footwear and foot orthoses on transverse plane rotation of the knee joint	Healthy adults	3D mocap	Stability shoe reduced peak knee internal rotation
Kim & Park (2016)	To investigate examine how the kinematics and kinetics of lower limb joints were changed depending on the unstable shoes	Healthy female	3D mocap	Suggests the possibility that of reducing the risks of pain, and osteoarthritis
Firminger et al. (2017)	To investigate the influence of minimalist footwear and stride length reduction	Recreational runners	3D mocap	No significant interactions between footwear and stride length
Langley et al. (2018)	To determine the influence of motion control, neutral and cushioned running shoes on foot kinematics	Healthy male	3D mocap	Midfoot-rearfoot eversion were significantly lower in the motion control shoe compared to the neutral and cushioned shoes
Langley et al. (2019)	To determine the influence of motion control, neutral and cushioned running shoes on lower limb kinematics	Healthy male	3D mocap	The influence of footwear condition larger changes reported at the ankle compared to knee and hip joints
Udofa et al. (2019)	To compare footwear condition on ground reaction force	Two mass model	Force plate	Ground reaction force-time patterns across footwear conditions can be accurately predicted using our two-mass, two-impulse model

통해 포괄적 비대칭 지수는 신경근 질환(예: 뇌졸중 또는 뇌성 마비)의 진행을 모니터링하는 것과 같은 중요한 임상 적용을 가질 수 있다고 하였다. 이 발견은 건강하고 젊은 성인의 보행 비대칭성이 맨발 달리기와 비교하여 신발을 신고 달리기를 했을 때 감소하며, 이는 구심성 감각 피드백의 변화에 의해 개선된 신경 근육 조절의 결과일 수 있음을 시사하였다(Table 1).

2. 기능성 신발의 사용성 평가

최근의 신발은 발 착지 시 발생하는 충격을 적절히 완화시킬 수 있지만, 근육과 관절 관련 부상을 피하기 위해 운동화를 신중하게 선택해야 한다. 따라서, 기능성 신발 착용 시 동작의 운동학적, 운동역학적 변인 관계를 파악하여 상해 예방을 위한 연구가 이루어지고 있다.

Sinclair, Bottoms, Taylor & Mahmood (2017)은 스쿼시 선수를 대상으로 미니멀리스트, 러닝화, 스쿼시 특유의 신발을 착용하여 3차원 동작 분석을 실시하였다. 그 결과 미니멀리스트 신발의 충격 부하가 크게 증가한 것으로 나타났으며 이러한 유형의 신발은 스쿼시 플레이어가 충격과 관련된 만성 부상의 위험이 증가할 수 있다고 하였다. 또한, 쿠션 높이, 착지 높이에 따른 신발의 효과를 조사한 연구에서는 신발 미드솔 재료 및 구조물에 관계없이 신발 쿠션 성능을 결정하면 경골 피로 골절에 대한 더 나은 보호를 위한 최적의 신발 모델을 식별할 수 있을 것으로 판단하였다(Wei et al., 2018). Sinclair와 Sant (2018)는 미니멀리스트, 하이컷, 로우컷, 일반 운동화를 착용한 후 농구의 특정 동작의 3차원 운동학 및 운동역학적 분석 연구를 진행하였다. 그 결과 부상 예방 차원에서 볼 때 기존의 일반 운동화는 만성 충격 관련 부상에 취약한 농구 선수에게

가장 적합하며, 하이컷 신발은 내측/외측 발목 안정성이 필요한 선수에게 가장 적합할 것이라는 결론을 도출하였다. 신발 유형 및 보폭 길이의 감소가 러닝 동작의 하지 역학 및 누적 하중에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되었는데, 결과는 일반적으로 미니멀리스트 신발을 신고 달리는 것이 중족 지절 관절과 발목관절에서 하중을 증가시켰지만(각각 7.3%, 5.9%) 무릎에서의 하중은 평균 7.3% 감소했다고 보고하였다. 이는 미니멀리스트(Minimalist) 신발 사용자들에게서 관찰된 관절의 과사용으로 인한 부상 발생의 일부를 설명할 수 있을 것으로 보고하였다(Firminger & Edwards, 2016). 이처럼 관절의 하중을 줄이고 근육을 강화하는 이점을 가진 로커 바닥 신발이 개발되었으나 과학적인 연구가 뒷받침되지 않았고 신경 근육이 부족한 환자에게는 위험 요소가 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다(Talaty, Patel & Esquenazi, 2016). 또한, 통증을 조절하고 수행력을 개선하기 위한 시도로 특정 유형의 발 타격에 적합하도록 특정 신발이 개발되어 부상 위험을 줄이고자 달리기 선수의 앞 무릎 통증 완화에 대한 맞춤형 신발의 효율성을 평가하는 연구에서도 과학적 근거의 필요성이 제시되었다(Sadigursky et al., 2017).

한편, 운동수행력 및 경기력 향상을 위한 신발 사용성 평가에 관한 연구도 진행되었다(Fu, Gu, Mei, Baker & Fernandez, 2019; Park et al., 2016a; Sinclair, Chockalingam, Naemi & Vincent, 2015; Sinclair, Rooney, Naemi, Atkins & Chockalingam, 2017; Sinclair & Sant, 2017; Sinclair, Toth, & Hobbs, 2015; Park et al., 2016b; Park, Kim & Park, 2015). 신발의 선택은 경기력 향상에 큰 영향을 줄 수 있다(Hunter et al., 2019). 2018년, 새로운 Nike Vaporfly 4% 러닝 슈즈를 착용한 한 선수는 마라톤, 하프 마라톤 및 15 km 장거리에서 세계 기록을 세웠다. Vaporfly 4% 러닝 슈즈는 다른 신발과의 실험을 통해 4%의 에너지효율 효과를 입증하였지만, 많은 사람들이 이 신발이 생리학적 기능과 기술적 기능 사이의 경계를 흐리게 하는지에 대해 논쟁하고 있으며, 보다 명확한 규제를 요구하고 있으며(Burns & Tam, 2019), 운동수행력과 경기력 향상을 위한 과학적인 증거가 뒷받침되어야 한다. Fu 등(2019)은 농구화, 축구화, 운동화의 세 가지 다른 신발 착용 후 달리기 동작 시 상하지 관절 각도를 조사하였다. 그 결과 세 가지 신발 유형별로 무릎관절에서 유의미한 차이가 나타났으며, 특히 운동화는 농구화와 축구화보다 무릎관절의 굴곡이 큰 것으로 보고하였다. 또한, 농구화와 축구화 사이의 발목 외측 회전에서는 큰 차이가 없었으며, 둘 다 운동화보다 발목과 무릎관절의 가동범위가 더 크다고 하였다. Sinclair 등(2015) 미니멀리스트, 에너지 리턴 신발 및 기존 신발이 운동역학, 3차원 운동학 및 점프 수행력의 시간적 측면에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 기존 신발과 에너지 리턴 신발에 비해 미니멀리스트 신발에서 점프 높이가 현저하게 낮은 것으로 나타났다. 이는 미니멀리스트 신발이 부상 위험

을 감소시키는 매개 변수와 관련될 수 있지만 점프 수행력의 감소와도 관련이 있다고 보고하였다. 이런 결과를 통해 점프와 관련된 스포츠에 적합한 신발을 선택할 때 성능과 부상에 대한 민감성 사이에 잠재적 절충이 존재할 수 있음을 시사하였다. Sinclair 등(2017)은 미식축구 선수의 하이 컷, 로우 컷 신발 착용 후 러닝, 방향전환 동작, 수직 점프를 수행하게 하고 경골 장착 가속도계와 3차원 동작 분석시스템을 사용하여 측정을 실시하였다. 그 결과 러닝 및 방향전환 운동 조건에서 로우 컷 신발이 발목관절 외반의 최대값과 경골의 내측 회전 변수가 유의하게 더 크게 나타났다고 보고하였다. 이러한 연구 결과를 통해 훈련 및 수행력 향상을 위해 로우 컷 미식축구 신발을 사용하면 미식축구 선수들이 만성 부상으로 인한 위험이 높아질 수 있다고 하였다. Sinclair와 Sant (2017)는 맨발, 크로스 핏, 미니멀리스트, 기존 신발 착용 후 달리기의 운동학 및 운동역학에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 보행 시 발목 각도는 기존의(5.09°) 및 크로스핏(2.16°) 조건에 비해 맨발(8.70°) 및 미니멀리스트(0.92°) 조건에서 상당히 더 많이 족저 굴곡된 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 맨발 및 미니멀리스트 신발은 달리기 활동 중에 크로스 핏 운동 선수가 만성 병리의 위험을 증가시킬 수 있다고 보고하였다. Sinclair 등(2015)은 넷볼 특유의 신발과 미니멀리스트 신발이 운동역학 및 3차원 운동학에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. 러닝과 방향전환, 수직 점프 동작을 수행하였고 운동학적 분석 결과는 미니멀리스트에서 충격 매개 변수가 유의하게 더 컸으며, 러닝 운동에서도 발목관절 외반의 최대값이 유의하게 큰 것으로 보고하였다. 따라서, 넷볼 훈련 및 수행력에 미니멀리스트 신발의 활용이 넷볼 특정 신발의 지속적인 활용을 권장할 수 있는 만성 부상의 위험을 증가시킬 수 있다고 하였다. McHenry, Arnold, Wang & Abboud (2015)는 암벽 등반가들을 대상으로 한 단면적 연구를 실시하였는데 인구통계 자료를 활용하여 암벽 등반가들의 발과 신발 길이와 크기를 정량화하고자 하였다. 대부분의 암벽 등반가들은 지나치게 딱 끼는 신발을 신었으며, 이로 인해 91%가 발 통증을 느끼는 것으로 조사되었다. 결론을 통해 암벽 등반가들의 발 부상을 완화하고 수행력의 균형을 맞추는 추가적인 연구가 필요하다고 보고하였다. Papalia 등(2015)은 Masai Barefoot Technology (MBT) 신발이 보행 및 근육 활성화에 미치는 영향에 관한 문헌에 발표된 현재 최고의 증거를 수집하고 논의하고 가능한 이점에 대한 결론을 도출하였다. 신발 효과의 운동학적 분석 결과를 보고하고 근육 동원과 근활성 사이의 관계를 비교한 연구 결과를 토대로 자세 및 고유 수용성 회복 측면에서 MBT 신발의 유용한 역할을 결론 지을 수 있는 충분한 단서를 제공할 수 있다고 하였다. 하지만, 특정 병리학적 상태 또는 근골격 회복 과정의 특정 단계에 대한 적응을 자세히 결정하기 위해 명확하고 적절한 지침을 내릴 수 없는 한계가 있다고 보고하였다.

Table 2. Mainly study trends on the evaluation of usability of functional shoes

Author (year)	Purpose	Participants	Equipment	Main results
Sinclair et al. (2015)	To examine the influence of netball-specific and minimalist footwear on the kinetics and 3D kinematics	Female netball players	3D mocap	Utilization of minimalist footwear for netball training/performance may place netballers at increased risk from chronic injuries
Talaty et al. (2016)	Rocker bottom shoes usability evaluation	Healthy adults	3D mocap	Suggestions for cautions are provided for using rocker bottom shoes in patients with neuromuscular insufficiency
Park et al. (2016b)	To provide basic data for Korean bobsleigh footwear	Bobsleigh players	3D mocap	Presentation of basic data through kinematic analysis during start operation
Kwak & Yoon (2017)	Analysis on the effect of minimal shoes on lower limb kinematics and stability	Healthy male	3D mocap	Minimal shoes are likely to cause injury in the rear foot and shock absorption variables
Sinclair et al. (2017)	To examine the effects of squash-specific, running shoes and minimalist footwear	Squash players	Force plate, accelerator, 3D mocap	Minimalist footwear may place squash players at an increased risk of developing impact-related chronic injuries
Sinclair et al. (2017)	To comparatively examine the effects of barefoot, cross-fit, minimalist and conventional footwear	Healthy male	3D mocap	Barefoot and minimalist footwear may place cross-fit athletes at increased risk from chronic pathologies
Wei et al. (2018)	To examine the effects of different landing heights and shoes of different cushioning performance	Basketball players	Accelerator, 3D mocap	Determination of shoe cushioning performance help to identify optimal shoe models for better protection against tibial stress fracture
Sinclair et al. (2019)	To examine the effects of existing minimalist footwear, new sock-style minimalist footwear and conventional running footwear	Healthy male	3D mocap, muscular modeling	Minimalist footwear may place non-habituated runners at greater risk from the mechanical factors linked to the etiology of chronic lower limb running-related injuries

특히, 최근에는 근골격 시뮬레이션과 통계적 파라메트릭 맵핑(statistical parametric mapping) 접근방식을 사용하여 기존의 미니멀리스트 신발, 새 양말 스타일의 미니멀리스트 신발 및 기존의 러닝 신발이 하지 생체역학에 미치는 영향에 관한 연구도 진행되었다. 이에 따르면 미니멀리스트 신발은 만성 하퇴부 운동 관련 부상의 병리학과 관련된 기계적 요인에 의해 더 큰 위험 요소로 작용할 수 있다고 보고하였다(Sinclair, Brooks & Stainton, 2019). 또한 Cho와 Chae (2017)는 모션 캡처와 유한요소법을 이용하여 마사이 신발과 일반 신발을 신었을 때, 보행 중 허리에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. 이 연구에서 인간의 움직임은 모션 캡처로 측정하고, 동작 분석 소프트웨어 근골격 모델링 프로그램(OpenSim)을 사용하여 마커의 움직임을 통해 관절 각도 및 근육 힘을 구하였다(Table 2).

3. 스마트 신발 연구개발

최근 신발 연구에서 IT 기술과 융합하여 디자인, 보행, 건강의 정보를 확인할 수 있는 연구들이 국내외에서 진행되고 있다. 크게 연구 현황, 특성분류, 센서활용을 주제로 연구되었다. 국내에서 스마트 신발의 연구들을 살펴보면, Park 등 (2017a)이 3D 프린팅 기술을 활용하여 개발된 신발 현황을 연구하였다. 연구를 통해 신발 제작 시 빛을 이용해 액체 수지로 모양을 만들고 열을 이용하여 굳히는 디지털 라이트 합성 기술, 3D 드로잉 기술을 이용한 3D 프린트 신발 등의 연구를 소개하였다. 또한, 국내 신발 기업에서 나타나는 인력 부족과 시장의 미성숙 등의 문제점 제시와 기업 육성 및 인력 양성을 포함한 산업 간 융·복합적 발전을 위한 지원 정책 제도 마련

의 필요성을 제시하였다. Park 등(2017b)은 최근 첨단 기술과의 융합과 웨어러블 기기 연동을 통하여 새로운 정보를 제공하는 스마트 신발의 현황 및 전망을 연구하였다. 현재 스마트 신발 시장을 선점하고 있는 글로벌 기업으로 N사와 A사가 대표적이며, N사는 단일 가속도 센서 모듈 장착을 기반으로 iPhone과 연동하여 운동량을 모니터링 할 수 있도록 제공하였으며, A사의 스마트 신발은 심박수 측정과 PC를 기반으로 데

이터를 저장하는 기능의 차이를 두었음을 확인하였다. 또한 압력감응 센서를 응용하여 개발한 스마트 인솔, 보행으로 전기를 생산할 수 있는 장치 개발 등 다양한 스마트 신발 기술을 언급하였다.

두 번째로 특성을 분류한 연구에서 Moon & Song (2017)은 스마트 신발의 다양한 기능을 구현하기 위해서 신발의 각 부품들이 구조 및 특성들을 분류하였으며, 신발 내부에 장착 시

Table 3. Mainly study trends on the development of smart shoes

Author (year)	Purpose	Participants	Equipment	Main results
Kim et al. (2016)	Development of wearable devices and applications for health care	Shoes applications	Pressure and humidity sensor	Identify the load distribution and the environment inside the shoes
Park et al. (2017a)	Current status of footwear research using 3D prints	3D print	Meta-analysis	3D printed technology converged to the shoe industry
Park et al. (2017b)	Current status and prospects of smart shoes technology development	Smart shoes	Meta-analysis	Create high value added with convergence technology products that can create new markets
Kim & Kwon (2017)	Research on smart training shoe system	Smart taining footwear system	Real-time healthcare system	Provide optimized exercise information for athletes and trainers
Park et al. (2016b)	Development of Korean bobsleigh shoes	Out-sole material with non-slip properties	Out-sole material with multiple pin materials	Increased thermal effect
Jun et al. (2018)	Develop smart shoes to prevent musculoskeletal disorders	10 men in their 20s	Pressure sensor	Self-checking musculoskeletal disease induced work position through smart shoes
Li et al. (2016)	Suggestion of using GRF and moment measured by smart shoes	Configure a walk analysis system combined with motion sensors	Wearable sensor	Wearable sensor shoes are relatively simple and reliable compared to multiple inertial sensors
Lacirignola et al. (2017)	Provides a new environment for monitoring complex biomechanical behavior	Foot sensor	Force, Acc, Rotation and altitude change measurement system	Monitor changes in walking and help with rehabilitation
Rahemi et al. (2018)	Developing a foot-worn sensor to assess frailty	Gait performance of 161 older adults	Shin-worn inertial sensor	Yielded a highly accurate model in predicting frailty stages, irrespective of sensor location
Jeong et al. (2019)	Present a wireless charging system that can power shoe-based sensors	Shoe-based sensor	ANSYS HFSS	Simulation results match measured results with respect to coupling coefficient (k)
Shinde et al. (2019)	Introducing the smart shoes portable system	Smart shoes	2.4 GHZ bluetooth technology	Can help blind people

고려할 특성 등을 파악하였다. 따라서 스마트 부품들이 신발에 삽입될 때 착화감 및 고유 기능에 대한 장애 요인과 제거할 수 있는 신발 구조를 제안함으로써 스마트 신발의 기능을 높일 수 있는 방향을 제시하였다.

마지막으로 센서를 활용한 연구에서 Kim 등(2016)은 스마트한 건강관리를 위하여 신발 내에 부착된 압력 및 온습도 센서를 이용하여 사용자의 하중분포와 신발 내부의 온습도를 측정하고, 블루투스 통신을 이용하여 발의 건강상태를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 시스템을 만들었다. 이러한 웨어러블 기기와 어플리케이션을 통하여 사용자의 걸음걸이 정보 등으로 2차 질병을 예방하는데 활용될 수 있다고 하였으며, Kim & Kwon (2017)은 압력 센서, 가속도 센서, 자이로 센서가 탑재된 스마트 신발을 개발하고 블루투스 통신을 이용하여 스마트폰으로 데이터를 할 수 있도록 시스템을 개발하였다. 이러한 시스템을 통하여 실시간으로 트레이너가 사용자의 운동 정보(걸음수, 체지방, 칼로리 등)를 일괄적으로 관리할 수 있는 수단을 제공하며 운동자의 개인별 특성에 따라 관리할 수 있도록 제시하였다. 또한 근골격계질환 예방을 위하여 Jun 등(2018)은 작업환경 및 작업자세를 분석한 모니터링 케어시스템을 탑재한 센서내장형 스마트 신발 개발하여, 작업자 스스로가 보다 쉽게 근골격계 질환을 유발하는 작업자세에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 효율적인 골격계질환 예방 및 관리의 가능성을 언급하였다.

Li 등(2016)은 보행분석을 위해 하지의 관절 각도를 추정하기 위해 모션 센서와 웨어러블 센서 신발을 활용하였다. 웨어러블 센서 신발이 측정한 지면반력(GRF)과 모멘트를 사용하여 보행 평가를 위한 두 가지 모델 방법을 제시하였다. 첫 번째 모델에 있는 발목, 무릎, 엉덩이의 관절 각도의 인공신경망 추정치는 측정 결과와 일치했으며, 두 번째 모델의 무릎과 엉덩이의 관절 각도를 비교한 결과, 평균 RMSE (root mean square errors)와 상관관계수(R)는 일치했지만, 발목관절은 상대적으로 낮게 일치하였다. Pham, Diep & Phuong (2017)은 인간의 활동 인식을 위한 스마트 신발을 제안하였다. 스마트 신발의 안쪽에는 작은 무선 가속도 센서를 내장하였으며, 센서 신호를 분석하기 위해 데이터 감지로부터 기능을 자동으로 학습하고 활동을 예측하는 콘볼루션 신경망(Convolutional Neural Network) 모델을 제안하였다. 연구 결과는 보행 활동에서 높은 정밀도를 보였다. Shinde, Nalbalwar & Singh (2019)은 스마트 슈즈를 이용하여 보행 중 걸음걸이를 분석하여 2.4 GHz에서 작동하는 블루투스 기술을 활용하여 스마트폰을 이용하여 데이터를 수집하였다. 이 시스템을 계단, 장애물 감지, 전기생산, 낙상 감지 및 건강관리의 시스템을 하나로 결합하여 활용할 수 있다고 하였고, 시각장애인에게도 도움이 될 수 있다고 하였다. Cheng, Lam, Lin & Ge (2019)은 세계적으로 고령화사회로 변화되면서 노인의 발 관리와 안전을 위하여 데이터 마이닝을

통한 3D 맞춤형 디자인, 위성항법시스템(Global Positioning System) 및 RFID 기술을 이용하여 스마트 웨어러블을 개발하는 연구를 진행하였다. 그 결과 시제품 제작에 성공했으며, 맞춤형 디자인을 제공하는 것은 물론, 위치 추적 기능을 갖추어 노인 안전 서비스도 효과적으로 제공하였다. 국외 연구들은 대부분 센서를 탑재하여 기능성 신발을 만드는 연구를 했으며, 일반인 뿐만 아니라 장애인과 노인을 위한 안전성이 같이 있는 스마트 신발이 연구되고 있다(Table 3).

FUTURE RESEARCH DIRECTIONS AND SUGGESTIONS

신발 관련 운동학 및 운동역학적 연구는 오랜 기간에 걸쳐 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 신발과 인체가 상호작용하는 연구를 통해 안정성 강화 훈련의 치료 중재 도구의 가능성을 제시하였으며(Kim & Park, 2016), 하지관절의 부상을 줄이기 위한 연구도 진행되었다(Sayer et al., 2019; Kim & Park, 2016). 특히, 신발의 쿠션이 충격력을 흡수하여 발목을 포함한 인체 여러 관절에 부상을 예방한다는 주장과 오히려 충격력과 충격 부하율을 증가시켜 부상을 야기할 수 있다는 상반된 연구 결과가 보고되고 있어 명확한 규명을 위한 후속 연구가 필요하다(Song et al., 2008; Kulmala et al., 2018; Langley et al., 2019). 또한, 신발의 구조 조건과 관련해서 관절의 과사용과 통증 완화를 위한 맞춤형 신발의 효율성을 평가하기 위해 과학적인 근거가 뒷받침 되어야 한다(Talaty et al., 2016; Sadigursky et al., 2017). 특히, 보행과 러닝 동작 시 운동역학적 반응과 신경 근육 변화에 대한 연구는 국외 연구에 비해 부족한 실정으로 이에 대한 연구도 절실히 필요하다. 기능성 신발 연구는 운동학적 및 운동역학적 변인 관계를 파악하여 상해 예방을 위한 연구가 진행되었으며, 미니멀리스트 신발과 비교한 연구가 주를 이루었다(Sinclair et al., 2017; Sinclair & Sant, 2018; Firminger & Edwards, 2016). 운동수행력 및 경기력 향상을 위한 신발의 사용성 평가에 대한 연구는 농구, 축구, 육상 등 대중적인 스포츠 분야에서 연구되었지만(Fu et al., 2019; Burns & Tam, 2019, Sinclair et al., 2017), 국내 스포츠 분야에서는 볼슬레이로 주로 한정되어 다양한 스포츠 분야에서의 연구가 필요하다(Park et al., 2015; Park et al., 2016b). 스마트 신발 개발 연구는 4차 산업혁명과 함께 ICT를 적용한 다양한 스마트 신발들이 개발되고 있지만, 실시간으로 데이터를 측정하는 신발이 상용화되지는 못하고 있다. Cheng 등(2019)과 같이 일반인들에게만 적용되는 스마트 신발이 아니라, 장애인, 하지 환자, 노인들을 대상으로 재활이나 건강한 보행을 위해 필요한 정보를 제공할 수 있는 스마트 신발 연구가 진행되길 기대한다. 또한, Shinde 등(2019)의 연구에서 언급된 전기생산과 같이 친환경적, 에너지 재생산을 위한 스마트 신발 연구들도 미래를 위해서 연구되어

야 할 것이다. 이에 지금까지 고찰한 선행연구를 바탕으로 향후 신발 연구 방향을 제안하고자 한다.

첫째, 친환경 소재의 신발을 개발하여 근육 활동의 협응과 동작 제어 및 상해 예방을 위한 연구 방안이 모색되어야 하며, 물리적인 측면, 재질, 바닥 모양과 마찰 관계 등의 과학적 증거가 뒷받침 되어야 할 것이다.

둘째, 근육 활동의 협응 및 상해 예방과 함께 경기력 향상을 위하여 신소재를 활용한 기능성 신발을 기반으로 다양한 종목의 엘리트 선수를 대상으로 한 연구가 필요하다.

셋째, 인간의 행동 정보를 통하여 실시간으로 다양한 정보와 에너지 생산이 가능하고, 신발-센서-인체의 상호작용을 통한 HMI (Human Machine Interface) 기술의 적용 방안을 모색해야 할 것이다.

종합적으로 위와 같이 제시한 연구를 통해서 신발 연구 기술의 종합적인 발전과 신발산업의 활성화에 기여할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Burns, G. T. & Tam, N. (2019). Is it the shoes? A simple proposal for regulating footwear in road running. *British Journal of Sports Medicine*, 1(1), 1-2
- Byun, K. S. (2010). *Biomechanical analysis of different outsole types of functional walking shoes*. Unpublished Master's degree thesis, Graduate School of Sungkyunkwan University.
- Cheng, W. K., Lam, H. L., Lin, F. & Ge, M. (2019). A customizable smart shoes with location tracking function for the elderly. *Materials Today: Proceedings*, 16, 1423-1430.
- Cho, H. S. & Chae, S. W. (2017). The Effect of Masai Shoes on Lumbar Disc using Motion Capture and FEM. *Korean Society for Precision Engineering*, 628-628.
- Choi, K. J. (2003). *Biomechanical differences between general walking shoe and MBT functional walking shoe*. published Doctor's Dissertation. Unpublished Graduate School of Sungkyunkwan University.
- Dames, K. D. & Smith, J. D. (2016). Effects of load carriage and footwear on lower extremity kinetics and kinematics during overground walking. *Gait Posture*, 50, 207-211.
- Firminger, C. R. & Edwards, W. B. (2016). The influence of minimalist footwear and stride length reduction on lower-extremity running mechanics and cumulative loading. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 19(12), 975-979.
- Firminger, C. R., Fung, A., Loundagin, L. L. & Edwards, W. B. (2017). Effects of footwear and stride length on metatarsal strains and failure in running. *Clinical Biomechanics*, 49(1), 8-15.
- Franklin, S., Grey, M. J., Heneghan, N., Bowen, L. & Li, F. X. (2015). Barefoot vs common footwear: a systematic review of the kinematic, kinetic and muscle activity differences during walking. *Gait & Posture*, 42(3), 230-239.
- Fredericks, W., Swank, S., Teisberg, M., Hampton, B., Ridpath, L. & Hanna, J. B. (2015). Lower extremity biomechanical relationships with different speeds in traditional, minimalist, and barefoot footwear. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14(2), 276-283.
- Fu, L., Gu, Y., Mei, Q., Baker, J. S. & Fernandez, J. (2019). A kinematics analysis of the lower limb during running with different sports shoes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 233(1), 46-52.
- Fuller, J. T., Bellenger, C. R., Thewlis, D., Tsiros, M. D. & Buckley, J. D. (2015). The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners. *Sports Medicine*, 45(3), 411-422.
- Hoerzer, S., Federolf, P. A., Maurer, C., Baltich, J. & Nigg, B. M. (2015). Footwear Decreases Gait Asymmetry during Running. *PLoS One*, 10(10), 1-12.
- Hunter, I., McLeod, A., Valentine, D., Low, T., Ward, J. & Hager, R. (2019). Running economy, mechanics, and marathon racing shoes. *Journal of Sports Sciences*, 37(20), 2367-2373.
- Hutchison, L., Scharfbillig, R., Uden, H. & Bishop, C. (2015). The effect of footwear and foot orthoses on transverse plane knee motion during running-A pilot study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(6), 748-752.
- Jeong, N. S., Hackett, E. G., Lee, J. Y. & Sazonov, E. (2019). Loosely Coupled Wireless Charging of Footwear-based Sensor System. *IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference*, 1-3.
- Jun, S. P., Yoo, Y. W. & Park, S. B. (2018). The Pre-Study of Development of Smart Shoe with Musculoskeletal Injury Prevention and Monitoring System: Selection of Plantar Pressure Sensor Location and Development of Prototype. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 37(2), 101-110.
- Kim, Y. J. & Park, J. W. (2016). The Influence of Unstable Shoes on Kinematics and Kinetics of the Lower limb Joints during Sit-to-stand task. *The Journal of Korean Physical Therapy*, 28(1), 14-21.
- Kim, H. S., Lee, U. H. & Kim, J. C. (2016). Development of an IoT-Based Small Wearable Device Attachable to Shoes for Healthcare. *The Korean Institute of Broadcast and Media*

- Engineers*, 1(2), 154-156.
- Kim, K. I. (2015). Forecast of rapid market growth due to convergence with smart shoes and health care systems. *Kisti Market Report*, 1(1), 3-6.
- Kim, T. S. & Kwon, S. R. (2017). Real Time Healthcare System using Smart Shoes. *The Institute of Electronics and Information Engineers*, 1(1), 1372-1373.
- Kim, Y. J. & Chae, W. S. (2007). The Plantar Pressure Comparison between the Curved Rear Balance Shoes and Normal Shoes. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 17(3), 173-180.
- Kulmala, J. P., Kosonen, J., Nurminen, J. & Avela, J. (2018). Running in highly cushioned shoes increases leg stiffness and amplifies impact loading. *Scientific Reports*, 8(1), 17496.
- Kwak, C. S. & Yoon, J. S. (2017). The Effects of Minimal Shoe on Lower Extremity Biomechanics and Safety During Running. *Korean Journal of Teacher Education*, 33(1), 113-130.
- Lacirignola, J., Weston, C., Byrd, K., Metzger, E., Singh, N., Davis, S. ... & Richter, M. (2017). Instrumented footwear inserts: a new tool for measuring forces and biomechanical state changes during dynamic movements. *IEEE 14th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*. 119-124.
- Landorf, K. B. & Keenan, A. M. (2002). An evaluation of two foot-specific, health-related quality-of-life measuring instruments. *Foot & ankle International*, 23(6), 538-546.
- Langley, B., Cramp, M. & Morrison, S. C. (2018). The influence of running shoes on inter-segmental foot kinematics. *Footwear Science*, 10(2), 83-93.
- Langley, B., Cramp, M. & Morrison, S. C. (2019). The Influence of Motion Control, Neutral, and Cushioned Running Shoes on Lower Limb Kinematics. *Journal of Applied Biomechanics*, 35(3), 216-222.
- Li, G., Liu, T., Yi, J., Wang, H., Li, J. & Inoue, Y. (2016). The lower limbs kinematics analysis by wearable sensor shoes. *IEEE Sensors Journal*, 16(8), 2627-2638.
- McHenry, R. D., Arnold, G. P., Wang, W. & Abboud, R. J. (2015). Footwear in rock climbing: Current practice. *The Foot (Edinb)*, 25(3), 152-158.
- Moon, K. S. & Song, H. S. (2017). A shoe structure for function implementation of a smart shoe. *Korean Society for Precision Engineering*, 617-617.
- Nam, H. C., Moon, G. H. & Choi, Y. J. (2016). Changes in Balance and Gait Patterns with Different Heel Heights Among Women in Their 20's. *Journal of The Korean Society of Integrative Medicine*, 4(1), 49-56.
- Nam, K. J., Lee, J. H. & Kim, J. P. (2015). The Review of Biomechanical Analysis of Functional shoes for invent a nurses shoes. *Korean Journal of Sports Science*, 24(3), 1617-1627.
- Nigg, B. M. (1986). *Some comments forerunners*. In *Biomechanics of running shoes*, N.M.nigg (ed), champaign: Human Kinematics Publishers, 1(1), 162-165.
- Papalia, R., Di Pino, G., Tecame, A., Vadalà, G., Formica, D., Di Martino, A. & Denaro, V. (2015). Biomechanical and neural changes evaluation induced by prolonged use of non-stable footwear: a systematic review. *Musculoskeletal Surgery*, 99(3), 179-187.
- Park, J. J., Kim, K. H. & Park, S. B. (2015). The Analysis of Foot Pressure and Lap Time for the Development of Korean Bobsleigh Shoes. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 25(4), 465-474.
- Park, J. J. & Park, S. B. (2015). Biomechanical Analysis for the Development of Windlass Mechanism for Trail-walking Shoe. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 25(4), 489-498.
- Park, S. B. (2006). A Biomechanical Footwear Research & Analysis in Korea and Past, Present and Future in International Research Trend. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 77-82.
- Park, S. B., Kim, C. H. & Joo, J. P. (2006). A Biomechanical Research in functional footwear development for Degenerative Osteoarthritis Patients. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 83-89.
- Park, S. B., Lee, K. D., Kim, D. W., Yoo, J. H., Jung, J. M., Park, K. H. & Ryu, W. H. (2016a). Development of biomechanics-based sports climbing shoes with excellent sweat absorption and quick drying through plantar pressure analysis. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 414-414.
- Park, S. B., Lee, K. D., Kim, D. W., Yoo, J. H., Jung, J. M., Park, K. H. & Kim, J. H. (2016b). An Analysis of Lower Extremity of Range of Motion and Forefoot Bending Angle in Bobsleigh Start by Bobsleigh Shoe. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 589-590.
- Park, S. B., Lee, K. D., Kim, D. W., Yoo, J. H., Jung, J. M., Park, K. H. & Ryu, W. H. (2017a). Current status of footwear development using 3D printing. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 232-232.
- Park, S. B., Lee, K. D., Kim, D. W., Yoo, J. H., Jung, J. M., Park, K. H. & Ryu, W. H. (2017b). Current status and prospect of smart shoes technology development. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 219-219.
- Pham, C., Diep, N. N. & Phuong, T. M. (2017). e-Shoes: Smart

- shoes for unobtrusive human activity recognition. *In 2017 9th International Conference on Knowledge and Systems Engineering*, 269-274.
- Rahemi, H., Nguyen, H., Lee, H. & Najafi, B. (2018). Toward smart footwear to track frailty phenotypes—using propulsion performance to determine frailty. *Sensors*, *18*(6), 1763.
- Sadigursky, D., Santos, N. A. M., Queiroz, G. C. D., Oliveira, L., Souza, M. P. D., Carneiro, R. J. F. & Colavolpe, P. O. (2017). Customized footwear for motion control to treat anterior knee pain among runners. *Medical Express*, *4*(2), 1-7.
- Sayer, T. A., Hinman, R. S., Paterson, K. L., Bennell, K. L., Fortin, K., Kasza, J. & Bryant, A. L. (2019). Differences and mechanisms underpinning a change in the knee flexion moment while running in stability and neutral footwear among young females. *Journal of Foot and Ankle Research*, *12*(1), 1-9.
- Shin, H. S., Lee, K. K., Kim, M. S. & Park, J. H. (2007). The effects of shoes with curved out-sole on the variations of static posture and EMG of calf. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 267-277.
- Shinde, M. R. A., Nalbalwar, S. L. & Singh, S. (2019). Smart Shoes: Walking Towards a Better Future. *International Journal of Engineering Research & Technology*, *8*(7), 328-330.
- Sinclair, J. & Sant, B. (2017). The effects of cross-fit footwear on the kinetics and kinematics of running. *Footwear Science*, *9*(1), 41-48.
- Sinclair, J. & Sant, B. (2018). Effects of High-and Low-Cut Footwear on the Kinetics and 3D Kinematics of Basketball Specific Motions. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, *18*(1), 1-26.
- Sinclair, J., Bottoms, L., Taylor, P. J. & Mahmood, K. (2017). Effects of shoes on kinetics and kinematics of the squash forward lunge in male players. *Kinesiology: International Journal of Fundamental and Applied Kinesiology*, *49*(2), 178-184.
- Sinclair, J., Brooks, D. & Stainton, P. (2019). Biomechanical effects of a lightweight, sock-style minimalist footwear design during running: a musculoskeletal simulation and statistical parametric mapping approach. *Footwear Science*, *11*(2), 71-83.
- Sinclair, J., Chockalingam, N., Naemi, R. & Vincent, H. (2015). The effects of sport-specific and minimalist footwear on the kinetics and kinematics of three netball-specific movements. *Footwear Science*, *7*(1), 31-36.
- Sinclair, J., Rooney, E., Naemi, R., Atkins, S. & Chockalingam, N. (2017). Effects of footwear variations on three-dimensional kinematics and tibial accelerations of specific movements in American football. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, *17*(02), 1-16.
- Sinclair, J., Toth, J. & Hobbs, S. J. (2015). The influence of energy return and minimalist footwear on the kinetics and kinematics of depth jumping in relation to conventional trainers. *Kinesiology: International Journal of Fundamental and Applied Kinesiology*, *47*(1), 11-18.
- Song, J. H., Lee, J. H. & Sung, B. J. (2008). A Comparative Analysis in Kinetics between Spring Shoes and Normal Shoes. *Korean Journal of Sport Science*, *19*(1), 1-8.
- Talaty, M., Patel, S. & Esquenazi, A. (2016). A Randomized Comparison of the Biomechanical Effect of Two Commercially Available Rocker Bottom Shoes to a Conventional Athletic Shoe During Walking in Healthy Individuals. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, *55*(4), 772-776.
- Udofa, A. B., Clark, K. P., Ryan, L. J. & Weyand, P. G. (2019). Running ground reaction forces across footwear conditions are predicted from the motion of two body mass components. *Journal of Applied Physiology*, *126*(5), 1315-1325.
- Wegener, C., Greene, A., Burns, J., Hunt, A. E., Vanwansseele, B. & Smith, R. M. (2015). In-shoe multi-segment foot kinematics of children during the propulsive phase of walking and running. *Human Movement Science*, *39*(1), 200-211.
- Wei, Q., Wang, Z., Woo, J., Liebenberg, J., Park, S. K., Ryu, J. & Lam, W. K. (2018). Kinetics and perception of basketball landing in various heights and footwear cushioning. *PLoS One*, *13*(8), 1-9.
- Yeo, M. W., Lee, S. D. & Lee, B. H. (2006). Comparison of functionality through ergonomic evaluation of functional momentum increased shoes. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 537-540.