

The Effect of Midsole Hardness of Running Shoe on Fatigue of Lower Extremity Muscles and Impact Force

런닝화의 미드솔 경도가 하지 근육의 피로와 충격력에 미치는 영향

Eonho Kim¹, Kyuchan Lim², Seunghyun Cho, Kikwang Lee³

¹Korea Institute of Sports Science, Seoul, South Korea

²Department of Sports Science, Ulsan University, Ulsan, South Korea

³Department of Sport & Health Rehabilitation, University of Kookmin, Seoul, South Korea

Received : 17 June 2019

Revised : 04 July 2019

Accepted : 11 July 2019

Objective: The aim of this study was to investigate the effect of midsole hardness of running shoe on muscle fatigue and impact force during distance running.

Method: Ten healthy college recreational runners who were performing distance running at least three times a week participated in this experiment. They were asked to run for 15 minutes in the treadmill at 10 km/h with running shoes having three different types of midsole hardness (Soft, Medium, Hard). EMG signal and insole pressure were collected during the first and last one minute for each running trials. Data were analyzed using a one-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures.

Results: Midsole hardness did not affect the consistency of stride length. For the median frequency of the EMG signal, only VL was affected by midsole hardness; that of medium was greater than other midsoles ($p<.05$). The loading rate of impact forces increased by midsole hardness ($p<.01$).

Conclusion: Although soft midsole could attenuate impact forces at heel contact, it might have a negative effect on the fatigue of muscle which could decelerate the body after heel contact. Therefore, it is necessary to select the optimum hardness of midsole carefully for both reduction impact forces and muscle fatigue.

Keywords: Midsole hardness, Muscle fatigue, Impact force, Running

Corresponding Author Kikwang Lee

Department of Sport & Health
Rehabilitation, University of
Kookmin, Jeonneung 77, Seoul,
02707, South Korea
Tel : +82-10-4911-3399
Fax : +82-2-910-5253
Email : kkleee@kookmin.ac.kr

INTRODUCTION

달리기 시 발이 지면에 착지하는 순간, 인체는 지면으로부터 체중의 2.5-2.8배에 달하는 힘을 반복적으로 받게 된다(Munro, Miller & Fuglevand, 1987). 이러한 충격은 하지의 골격과 근육, 건과 인대, 관절 등에 반복적으로 가해져 스트레스 골절과 같은 과사용 손상을 유발한다. 실제 반복적인 부하에 의한 과사용 손상은 전체 달리기 손상의 50-75%를 차지한다(Van Mechelen, 1992).

따라서 지난 수십년 간 착지 시 충격력의 크기와 하지 손상과의 관계를 규명하려는 많은 연구들이 진행되어 왔다. Milner, Ferber, Pollard, Hamill & Davis (2006)의 연구에 따르면, 달리기 시 지면과의 반복적인 충격은 스트레스 골절의 가능성을 증가시키기 때문에 충격력을 조금이라도 감소시켜 주는 것이 중요하다고 강조하였다. 한편, Park et al. (2018)은 달리기 속도가 빨라질수록 충격력이 증가하기 때문에, 빠른 달리기 속도의 달리기 시 하지의 인대와 뼈에 대한 잠재적인 부상 위험을 줄이기 위한 노력이 필요하다고 하였다. 한편, 착지 시 발생하

는 충격은 하지 손상뿐만 아니라 슬개대퇴 증후군, 하부요통, 고관절 통증, 무릎 통증 등 다양한 하지 통증을 유발하는 요인이라고 보고하고 있다(Pohl, Mullineaux, Milner, Hamill & Davis, 2008; Hamill, Miller, Noehren & Davis, 2008).

런닝화는 이러한 충격력을 완화시켜 신체 고유의 자연 충격 흡수제(뒤꿈치 패드, 뼈, 근육)가 받는 부하를 줄여주는데(Clarke, Frederick & Cooper, 1983), 특히 신발 내 미드솔의 충격 완화 기능이 반복적인 충격력에 의한 과사용 손상을 예방하는데 도움을 준다고 보고하고 있다(Meardon, Willson, Kernozek, Duerst & Derrick, 2018). Nigg, Hintzen & Ferber (2006)와 Ryu (2018)의 연구에 따르면, 적절한 쿠션의 미드솔은 발에 가해지는 충격을 흡수하는데 도움이 되고, 충격력을 2/3 수준으로 감소시킬 수 있다고 보고하였다. 한편 런닝화의 미드솔 경도에 따른 쿠셔닝의 생체역학적 효과를 연구한 Lee (2005)에 따르면 미드솔의 쿠션 기능이 우수할수록 수직 성분의 최대 충격력과 충격력 부하율을 감소한다고 보고하였다.

이와 같이 많은 연구들이 미드솔의 쿠션이 반복적인 충격력을 줄여준다고 보고하고 있으나, 최근에는 쿠션의 부정적인 효과를 주장하는 연구들도 진행되었다. Kulmala, Kosonen, Nurminen & Avela (2018)은 과도한 쿠션의 신발은 빠른 속도의 달리기에서 다리를 뻗듯하게 만들어 충격력과 충격 부하율을 오히려 증가시켜 부상을 야기할 수 있다고 보고하였다. 또한 미드솔의 경도와 하퇴 근육의 피로도의 관계에 대하여 연구한 Cheung과 Ng (2010)은 부드러운 쿠션의 런닝화를 신고 장거리 달리기를 실시하였을 때 하퇴 근육의 활동이 불안정해지며 피로를 더 유발한다고 보고하였다.

한편 대부분 미드솔 쿠션에 대한 연구들에서 비교하였던 런닝화들은 기존 제품이라는 것을 고려하였을 때, 미드솔 경도뿐만 아니라 무게, 구조, 모양, 재질 등이 동일하게 통제되지 못하는 한계가 있었다. 또한 미드솔의 충격 흡수와 하지 근육의 피로 효과를 규명하고자 하는 연구는 찾아보기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 미드솔의 경도 이외에 모든 조건이 동일하도록 직접 제작한 런닝화를 이용하여, 미드솔 경도가 달리기 시 충격력과 하지 근육의 피로에 미치는 효과를 규명하는데 있다.

METHODS

1. 실험 참여자

본 연구를 위하여 일주일에 3회 이상 정기적으로 달리기를 실시하는 건강한 20대 남자 대학생 10명(22.6±2.01세, 17.4±2.18 cm, 70.3±5.7 kg)이 참여하였다. 참여자 모두 최근 6개월 이내 근골격계 질환 치료나 정형외과적 수술을 받은 적이 없었고, 실험을 시작하기 전에 모든 피험자들에게 실험 절차 및

방법에 대하여 설명한 후, 실험 참여 동의서를 받았다.

2. 측정 방법

1) 실험 도구

미드솔 경도(S: soft, M: medium, H: hard)를 제외한 라스트, 갑피, 아웃솔 등 모든 신발의 소재와 구조가 동일한 샘플 신발 3개를 직접 제작하여 실험에 사용하였다. 각 미드솔에 대한 경도, 중량, 증발율, 비중, 압축율, 탄성 등은 Table 1과 같다. 또한 하지 근육들의 피로도를 측정하기 위하여 근전도 센서(EMG, Delsys Inc, U.S)를 사용하였으며, 달리기 시 발이 지면에 닿는 임팩트 시점을 찾고 최대 충격력과 부하율을 계산하기 위하여 족저압력 센서(Pedar X, Novel.de, U.S)를 활용하였다.

Table 1. Midsole properties

Type	Soft	Medium	Hard
Hardness (asker C)	46	51	55
Weight (g)	310	308	301
Evaporate rate (%)	CR 170	CR 170	CR 170
Specific gravity (g/cm ³)	0.174	0.182	0.199
Compression set (%)	19	19	15
Resilience (%)	63	63	55

2) 실험 절차

본 실험은 달리기 수행에 의한 피로 효과를 배제하기 위하여, 각 피험자는 3일 동안 하루에 한 종류의 신발만 신고 실험에 참여하였다. 이때 측정 신발의 순서는 피험자에 의해 무작위로 정했으며, 해당 신발에는 트레드밀 달리기 시 착지 순간과 충격력을 측정하기 위하여 족저압력 센서(Pedar X, Novel.de, U.S)를 신발 내부에 장착하였다. 또한 피험자 하지 근육의 피로도를 측정하기 위하여 근전도 센서(EMG, Delsys Inc, U.S)를 총 8개의 근육 위 피부 표면에 부착하였으며, 족저압력 센서와 근전도 센서를 동조화시켰다. 피험자는 측정 신발에 적응하기 위하여 트레드밀 위에서 4 km/h의 속도로 4분 간 걷기를 실시하였다. 그 후 5분 간 휴식을 취한 다음, 7 km/h의 속도로 달리기를 시작하여 분당 1 km씩 속도를 점진적으로 높여 10 km/h 속도에서 15분 동안 지속적으로 달렸다. 이때 14분 지점에서 1분 동안 각 센서로부터 자료를 수집하였다. 만약 피험자가 달리는 도중 신체적 또는 체력적인 문제로 더 이상 뛸 수 없다

고 판단되는 경우 실험을 종료하였다.

3. 자료 처리

본 연구는 미드솔 경도가 근 피로와 충격력에 미치는 영향을 조사하기 위해 피로와 관련 있는 변인인 스트라이드 길이의 변동성과 근 피로도, 충격력 흡수와 관련 있는 변인인 임팩트 시 최대 충격력과 충격증가율을 산출하였다.

1) 스트라이드 길이의 변동성

보행의 형태는 스트라이드 길이와 빈도에 의하여 결정된다(Danion, Varraine, Bonnard & Pailhous, 2003). 15분 간 10 km/h로 달리는 동안 14분 지점에서 연속되는 20회의 스트라이드 시간을 각각 측정 후, 이를 스트라이드 길이로 환산하였다. 변동성은 스트라이드 길이의 평균을 분산으로 나눈 후 100을 곱해 백분율을 산출하였다.

2) 근 피로도

달리기에 의한 다리 근육의 피로도를 측정하기 위해 Figure 1과 같이 대퇴직근(Rectus Femoris; RF), 외측광근(Vastus Lateralis; VL), 내측광근(Vastus Medialis; VM), 대퇴이두근(Biceps Femoris; BF), 반건양근(Semitendinosus; ST), 전경골근(Tibialis anterior; TA), 외측비복근(Gastrocnemius Lateral; GL), 내측비복근(Gastrocnemius Medial; GM)이 위치한 피부 위에 근전도 센서를 부착하여 달리기 수행 14분 지점에서 1분 간 샘플링 속도 1111.11 Hz로 근전도 신호를 수집한 후, 10~500 Hz의 대역폭(bandwidth) 통과 필터링을 실시하였다. 그 후 근육의 피로도를 분석하기

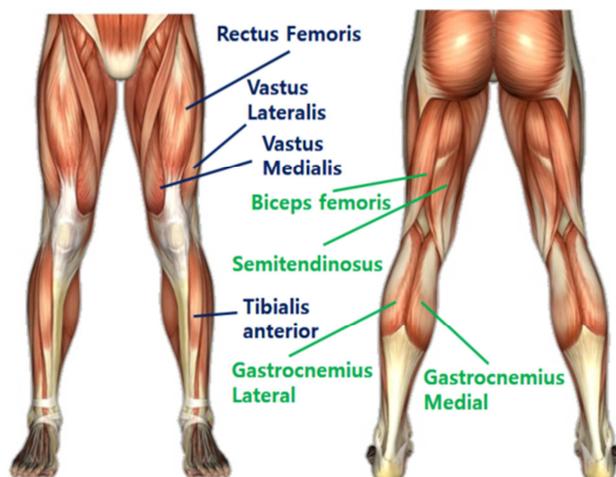


Figure 1. EMG attachment position

위해 중앙 주파수(median frequency)를 산출했다(Phinyomark, Thongpanja, Phukpattaranont & Limsakul, 2012).

3) 최대 충격력과 부하율

달리기 착지 시 지면이 신체에 가하는 충격력의 최대 값과 해당 지점까지 소요된 시간에 대한 힘의 변화를 측정하기 위하여 족저압력 센서를 활용하였다. 발바닥 전체의 압력을 측정할 경우 100 Hz까지 측정할 수 있는 족저압 센서를 이용해, 뒤꿈치 부분인 1/3 영역만 측정할 수 있도록 조정하여 300 Hz의 샘플링으로 압력을 측정하였다. 압력 값을 모두 더한 값을 충격력으로 가정하여 산출하였으며, 부하율(loading rate: RL), 즉, 충격력의 증가율은 최대 충격력을 발이 지면에 닿는 순간부터 최대 충격력이 발현되는 시점까지 소요된 시간으로 나누어 산출하였다.

4. 통계 분석

본 연구의 통계 처리는 런닝화의 미드솔 경도가 스트라이드 길이의 변동성과 근육의 피로, 충격력에 미치는 영향을 규명하기 위해 반복 측정 일원 분산 분석(One-way ANOVA with repeated measures)를 실시하였으며, 유의 수준은 $\alpha < .05$ 로 설정하였다. 미드솔 경도에 의해 유의한 차이가 나타났을 경우, 경도 별 차이를 조사하기 위해 사후 검증으로 LSD 방법을 사용하였다.

RESULTS

1. 스트라이드 길이의 변동성

스트라이드 길이와 변동성 모두에서 미드솔의 경도에 따라 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 2).

2. 근 피로도

Table 3는 각 근육과 신발에 대한 피로 후 하지 근육의 피로도에 대한 값을 나타내고 있다. VL에서 신발의 경도에 따라 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($F=3.644, p=0.04$). 사후 검증을 통하여 집단 간의 차이를 확인한 결과, Medium은 Soft에 비하여 통계적으로 높은 결과를 보였다($p=0.016$).

3. 최대 충격력과 부하율

미드솔 경도에 따라 최대 충격력은 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 부하율에서는 유의한 차이가 나타났다(Table 4). 부드럽

Table 2. Stride consistency

Stride length		Soft	Medium	Hard	<i>F</i>	<i>p</i>
	Mean ± SD (m)	2.09±0.22	2.06±0.11	2.09±0.14	0.045	0.956
CV (%)	7.64±5.30	4.96±1.42	5.54±1.79	1.791	0.186	

Table 3. Median Frequency of the lower extremities

Mean ± SD (Hz)	Soft (S)	Medium (M)	Hard (H)	<i>F</i>	<i>p</i>	Post hoc
VL	71.48±13.75	90.85±19.81	75.77±17.76	3.644	0.040	S<M
VM	72.41±10.12	71.22±19.21	71.31±11.65	0.310	0.970	
TA	96.48±25.31	94.32±30.02	99.25±19.72	0.07	0.933	
BF	88.21±34.33	70. ±20.73	75.79±13.83	1.224	0.310	
GL	93.44±21.64	93.01±15.46	92.69±17.75	0.011	0.989	
GM	96.41±19.49	101.23±16.95	97.65±14.19	0.290	0.751	
RF	50.65±14.73	54.13±15.32	56.75±14.40	0.411	0.667	

Table 4. Maximum impact peak and loading rate

Mean ± SD	Soft (S)	Medium (M)	Hard (H)	<i>F</i>	<i>p</i>	Post hoc
Max. IP (N/BW)	0.84±0.11	0.82±0.14	0.82±0.10	0.264	0.769	
Max. RL (N/BW/s)	19.08±3.98	21.73±4.61	23.29±4.93	6.622	0.002	S<M, S<H

러운 미드솔이 중간 미드솔과 딱딱한 미드솔에 비하여 부하율이 낮은 것으로 나타났다($p=0.026$, $p=0.001$).

DISCUSSION

중장거리 달리기와 같은 장시간의 운동 수행으로 인한 피로는 중추신경계의 기능 저하에 영향을 미친다. 피로 등에 의해 중추신경계에 신경적인 장애가 발생하면, 보행이나 주행 등의 동작에 변동성이 증가한다(Hausdorff et al., 1997; Hausdorff et al., 2003; Herman, Giladi, Gurevich & Hausdorff, 2005). 미드솔 경도에 의한 스트라이드 변동성은 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 부드러운 미드솔에서 분산이 상대적으로 높게 나타난 것은 과도한 쿠션에 대한 달리기 역학 적응 패턴이 개인적으로 다르게 나타난 것으로 보인다. 이러한 현상은 더욱 다양한 미드솔 경도와 더 많은 피험자를 동원한 연구를 통해 규명할 필요가 있다.

미드솔 경도가 하지 근육의 피로도에 어떠한 영향을 미치는지 규명하고자 근 피로를 대표하는 근전도 분석 방법인 중앙

주파수(Median frequency)를 분석하여 비교하였다(Jang & Kim, 2004). 하지 근육 중 유일하게 바깥넓은근(VL)만 미드솔 경도에 따라 근전도의 중앙 주파수가 다르게 나타났는데, 이는 미드솔 경도가 착지 직후 초기 감속부터 추진 직전까지의 동작에 기여하는 VL의 피로도에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Hammer, Seth & Delp, 2010). 즉, 보통 경도의 미드솔이 다른 미드솔에 비해 VL을 덜 피로하게 했다는 결과를 통해, 과도한 쿠션뿐만 아니라 딱딱한 미드솔 또한 충격 흡수를 위한 초기 감속 역할을 하는 근육에 부담을 줄 수 있다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 지나치게 부드러운 쿠션이 근육과 관절에 부정적일 수 있다는 연구(Kulmala et al., 2018)와 부분적으로 일치한다.

충격력과 부하율에 대한 본 연구의 결과는 부드러운 미드솔이 충격력 감소에 효과적이라는 많은 선행 연구들(Dixon, 2008; Ryu, 2016; Meardon et al., 2018; Ogston, 2019)과 일치한다. 하지만 이와 반대로, 부드러운 쿠션이 오히려 관절에 부과되는 충격력을 증가시킨다는 연구들도 있다. Kulmala et al. (2018)은 부드러운 쿠션의 신발이 달리기 속도가 빨라질수록 신체 중심 이동을 불규칙하게 하여 다리를 뺏뺏하게 만들고, 그 결과 충

격력과 충격 부하율을 증가시켜 부상의 위험을 증가시킨다고 하였다. 또한 장거리 달리기의 피로 시 쿠션의 변화에 따른 관절의 부하 정도를 나타낸 연구에서는, 부드러운 신발이 지지 구간에서 각 하지 관절들의 가동 범위를 증가시켜 피험자의 하지 관절 부하 증가에 기인하였다고 한다(Weir et al., 2019). 미드솔 경도가 중장거리 달리기 시 충격력에 미치는 영향을 연구하기 위해서는 트레드밀 위에서 달리는 상황보다 실제 트랙 위에 많은 지면반력기를 설치해 충격력을 측정하는 방법이 바람직하며, 충격력뿐만 아니라, 충격 흡수를 위한 근신경 전략 요인을 규명해 이를 비교, 분석할 필요가 있다.

CONCLUSION

미드솔 경도가 하지 근육의 피로도도와 충격력에 미치는 영향을 조사해본 결과, 스트라이드 변동성에는 차이가 나타나지 않았음에도 불구하고, 보통 강도의 미드솔이 부드러운 미드솔에 비해 착지 직후 감속을 담당하는 근육의 피로를 줄이는데 효과적이었다. 또한 충격력에 있어서는 미드솔의 강도가 영향을 주지 않았지만, 부드러운 미드솔이 부하율을 감소시켜주는 효과가 나타났다. 추후 연구에서는 신발 미드솔의 경도에 따른 스트라이드 길이의 변동성, 하지 근육들의 피로를 더욱 명확하게 확인하기 위하여 실험 참여자의 수뿐만 아니라 실제 신체가 충분한 피로를 느낄 수 있는 실험 프로토콜의 수행 시간 또는 강도를 증가시킬 필요가 있어 보이며, 피로 전 상황부터 일정 시간 동안의 변화 추이를 살펴보는 것 또한 요구된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Technology development Program (S2563279) funded by the Ministry of SMEs and Startups (MSS, KOREA).

REFERENCES

- Cheung, R. T. & Ng, G. Y. (2010). Motion control shoe delays fatigue of shank muscles in runners with overpronating feet. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(3), 486-491.
- Clarke, T. E., Frederick, E. C. & Cooper, L. B. (1983). Effects of shoe cushioning upon ground reaction forces in running. *International Journal of Sports Medicine*, 4(04), 247-251.
- Danion, F., Varraine, E., Bonnard, M. & Pailhous, J. (2003). Stride variability in human gait: the effect of stride frequency and stride length. *Gait & Posture*, 18(1), 69-77.
- Dixon, S. J. (2008). Use of pressure insoles to compare in-shoe loading for modern running shoes. *Ergonomics*, 51(10), 1503-1514.
- Hamner, S. R., Seth, A. & Delp, S. L. (2010). Muscle contributions to propulsion and support during running. *Journal of Biomechanics*, 43(14), 2709-2716.
- Hamill, J., Miller, R., Noehren, B. & Davis, I. (2008). A prospective study of iliotibial band strain in runners. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 23, 1018-1025.
- Hausdorff, J. M., Mitchell, S. L., Firtion, R., Peng, C. K., Cudkovicz, M. E., Wei, J. Y. & Goldberger, A. L. (1997). Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease. *Journal of Applied Physiology*, 82(1), 262-269.
- Hausdorff, J. M., Schaafsma, J. D., Balash, Y., Bartels, A. L., Gurevich, T. & Giladi, N. (2003). Impaired regulation of stride variability in Parkinson's disease subjects with freezing of gait. *Experimental Brain Research*, 149(2), 187-194.
- Herman, T., Giladi, N., Gurevich, T. & Hausdorff, J. M. (2005). Gait instability and fractal dynamics of older adults with a "cautious" gait: why do certain older adults walk fearfully?. *Gait & Posture*, 21(2), 178-185.
- Jang, K. & Kim, Y. H. (2004). Muscle fatigue analysis by median frequency and wavelet transform during lumbar extension exercises. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 25(5).
- 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.
- Lee, K. K. (2005). A Biomechanical Comparison of Cushioning and Motion Control Shoes During Running. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 15(3), 1-7.
- Mearndon, S. A., Willson, J. D., Kernozek, T. W., Duerst, A. H. & Derrick, T. R. (2018). Shoe cushioning affects lower extremity joint contact forces during running. *Footwear Science*, 10(2), 109-117.
- Milner, C. E., Ferber, R., Pollard, C. D., Hamill, J. O. S. E. P. H. & Davis, I. S. (2006). Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(2), 323-328.
- Munro, C. F., Miller, D. I. & Fuglevand, A. J. (1987). Ground reaction forces in running: a reexamination. *Journal of Biomechanics*, 20(2), 147-155.
- Nigg, B., Hintzen, S. & Ferber, R. (2006). Effect of an unstable shoe construction on lower extremity gait characteristics. *Clinical Biomechanics*, 21(1), 82-88.
- Ogston, J. K. (2019). Comparison of in-shoe plantar loading forces between minimalist and maximalist cushion running

- shoes. *Footwear Science*, 11(1), 55-61.
- Park, S. K., Koo, S., Yoon, S. H., Park, S., Kim, Y. & Ryu, J. S. (2018). Gender Differences in Ground Reaction Force Components. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 28(2), 101-108.
- Pohl, M. B., Mullineaux, D. R., Milner, C. E., Hamill, J. & Davis, I. S. (2008). Biomechanical predictors of retrospective tibial stress fractures in runners. *Journal of Biomechanics*, 41(6), 1160-1165.
- Phinyomark, A., Thongpanja, S., Hu, H., Phukpattaranont, P. & Limsakul, C. (2012). The usefulness of mean and median frequencies in electromyography analysis. In *Computational intelligence in electromyography analysis-A perspective on current applications and future challenges*. IntechOpen.
- Ryu, J. S. (2016). Effects of Prolonged Running-Induced Fatigue on the Periodicity of Shank-Foot Segment Coupling and Free Torque. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 28(3), 257-264.
- Ryu, J. S. (2018). Relationship between the Impact Peak Force and Lower Extremity Kinematics during Treadmill Running. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 28(3), 159-164.
- Van Mechelen, W. (1992). Running injuries. *Sports Medicine*, 14(5), 320-335.
- Weir, G., Jewell, C., Wyatt, H., Trudeau, M. B., Rohr, E., Brüggemann, G. P. & Hamill, J. (2019). The influence of prolonged running and footwear on lower extremity biomechanics. *Footwear Science*, 11(1), 1-11.