

오래 달리기로 인한 피로가 자유 토크 성분에 미치는 영향

류지선

한국체육대학교 생활체육대학 운동건강관리학과

Effect of a prolonged-run-induced fatigue on free torque components

Ji-Seon Ryu

Department of Health and Exercise Science, College of Lifetime Sport of Korea National Sport University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study was to investigate the differences in FT(free torque) components between non-fatigue and fatigue conditions that were induced from a prolonged running.

Methods: Fifteen healthy runners with no previous lower extremity fractures(22.0±2.1 years) participated in this study. Ground reaction force data were collected for the right stance phase for 10 strides of the 5 and 125-min running period at 1000Hz using an instrumented force platform(instrumented dual belt treadmills, Bertec, USA) while the subjects ran on it. Running speed was set for subjects' preference running speed which investigated before trial. FT variables were calculated from the components of moment and force output from the force platform. Repeated measure one-way ANOVA was used to test for significant differences between two conditions. The alpha level for all statistical tests was .05.

Results: Absolute FT at peak braking force was significantly greater after 5-min running compared to 125-min running that was regarded as a fatigue state, but there were no significant differences in absolute peak FT and impulse between conditions.

Conclusion: In conclusion, it might be conjectured that FT variables in fatigue condition during a prolonged running did hardly affect the tibial stress syndrome.

Key words: Free torque, impulse, fatigue, prolonged running, tibial stress syndrome, ground reaction force

I. 서 론

달리기는 활발한 신체 활동이 요구되는 스포츠로 편한 시간에 어느 곳에서나 수행할 수 있어 인기 있는 종목으로 자리 잡고 있다(Ids et al. 2010). 달리는 건강에 긍정적인 효과를

가져다주지만 때론 손상으로 인해 신체에 부정적인 영향을 준다. 달리기 중 오래달리기의 손상 발병률은 30-79%에 이르는 것으로 보고되고 있다 (Lun, Meeuwisse, Stergiou, & Stefanyshyn. 2004; Taunton et al., 2003; van Gent et al., 2007). 오래 달리기 시 발생하는 손상의 원인은 역학적 비정상, 이전 손상 경험, 성, 신체질량 지수와 같은 요인들뿐만 아니라 훈련 빈도 및 강도, 기간, 근력, 유연성, 신발, 피로와 같은 다양한 요인들에 의해 발생한다 (Taunton et al., 2003).

오래 달리기 손상 중 스트레스 골절은 주자(走者)들에게서 흔한 문제이며 달리기로 인한 손상의 큰 비중을 차지하는 것

Corresponding Author : Ji-Seon, Ryu Department of Health and Exercise Science, College of Lifetime Sport of Korea National Sport University, Seoul, Korea
Sport University, Seoul, 1239, Yangjae, Songpa-gu, Seoul, 138-763, Korea
Tel : +82-2-410-6822 / Fax : +82-2-410-6638
E-mail : jiseon@knsu.ac.kr

으로 보고되었다 (Taunton et al., 2002). 오래 달리기로 인한 스트레스 골절 중 경골 스트레스 골절은 가장 빈번하게 발생하는 손상으로 오래 달리기 골절 손상 중 35-56%를 차지한다 (Romani, Gieck, Perrin, Saliba, & Kahler, 2002). 달리기 시 경골 스트레스 골절을 야기하는 운동역학적 요인 중에 하나로 자유토크 (free torque)를 꼽고 있다 (Milner & Davis, 2006). 자유토크는 달리기 시 지지국면에서 발과 지면 사이 마찰력으로 인한 수직축에 대한 토크이다 (Holden & Cavanagh, 1991). 경골은 발에 대해 근위에 놓이기 때문에 이 토크는 경골에 비틀림 부하로 전이되어 달리기 시 경골의 스트레스 골절을 발생시킨다 (Pohl, Mullineaux, Milner, Hamill, & Davis, 2008). Holden & Cavanagh(1991)는 자유토크는 발의 회내 동작과 밀접한 관계가 있다고 보고했으며, Milner et al.(2006)은 후향성 연구 (retrospective study) 방법을 통해 경골 스트레스 골절 손상 경험을 가진 오래 달리기 주자들은 그렇지 않은 주자들에 비해 절대 자유토크가 크기 때문에 오래 달리기 시 손상을 경험했다고 주장했다. 또한 Pohl et al. (2008)은 후향성 연구를 통해 달리기 시 자유 토크는 여성 주자들의 경골 스트레스 골절을 예측하는데 가장 중요한 관심 변인이라고 주장했다. 이와 같이 선행 연구에서 달리기 시 비정상적인 절대 자유 토크는 경골에 작용해 정상적인 부하 패턴을 바꾸어 스트레스 골절을 야기 한다고 주장하고 있다. 선천적으로 달리기 시 자유 토크가 큰 주자들은 경골의 스트레스 골절의 잠재적 위험도가 높다고 선행 연구에서 주장하고 있지만, 이 절대 자유토크의 크기가 달리기 시간 경과에 따라 변함없이 작용해 경골의 스트레스 골절을 야기하는지, 혹은 이 자유 토크 크기가 달리기 시간 경과에 따른 피로 상태에서 증가해 경골에 부정적 영향을 미치는지에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 즉 자유토크가 선천적으로 큰 주자만 경골 스트레스 골절에 노출되는지 아니면 피로와 같은 후천적 요인에 의해 자유토크가 커져 경골 스트레스 골절을 야기하는지에 대한 정량적 결과는 제시되지 않고 있는 실정이다. 자유 토크에 영향을 주는 운동학적 요인 중 발의 회내 (Holden & Cavanagh, 1991)와 경골의 내측 회전 움직임은 피로 상태에서 증가된 것으로 보고된 선행 연구 (Ryu, 2001)에 기초해 볼 때 자유 토크 값도 피로 상태에서 변할 것으로 판단되지만, 구체적인 관찰의 필요성이 요구된다. 오래 달리기 손상의 원인 중 하나인 피로와 관련된 손상은 주로 운동 수행 후반에 발생하기 (Collins & Whittle, 1989) 때문에 오래 달리기 시 가장 빈번한 경골 스트레스 골절의 원인인 자유 토크를 피로 상태에서 살펴보는 것은 운동 수행과 임상학적 측면에서 중요한 통찰력을 제공하는 의미 있는 일이라 하겠다. 따라서 달리기 시 경골 스트레스 손상에 영향을 미치는 자유 토크를 오래 달리기 시간 경과에 따른 피로 상태에서 분석할 필요성이 요구된다.

피로란 근육이 더 이상 동일한 정도의 수축 신호에 반응하지 않아 (Kang, Kim, Seo, Yi, & Park, 2008; Ryu, 2001, 2013, 개인용)장력을 어느 특정 수준으로 유지할 수 없는 상태를 의미 한다 (Asmussen, 1979). 피로가 발생할 때는 근육 불쾌감과 통증을 수반하며, 운동 강도가 유산소성 에너지 생산 수준을 초과하거나 충분한 회복 시간을 확보하지 못해 에너지원이 고갈되거나 젖산과 같은 대사 부산물 등이 축적 된다 (Korean Society of Exercise Physiology[KSEP], 2014). 피로는 근력, 협응성, 정신적 주의와 집중을 해치기 때문에 손상의 가능성을 증가시킨다 (Collins & Whittle, 1989). 오래 달리는 시간과 거리가 증가 하면 할수록 피로가 가중되지만, 피로 상태를 정확하게 판단하는 것은 수축하는 근섬유 유형 성분, 운동 강도, 수축 활동 시간, 개인의 체력 정도에 따라 다르다. 그렇지만 일반적으로 최대 산소 섭취량의 70% 수준 혹은 최대 심박수의 75-80% 수준에서 달렸을 때 1시간 전후에서 피로의 느낌이 급격히 일어나는 것으로 보고되고 있다 (Ryu, 2001, 2013; Wilmore & Costill, 1994). 따라서 달리기 시 완전한 근 피로 상태라 간주되기 위해서는 위와 같은 운동 강도에서 최소한 1시간 이상을 달려야 하지만, 이들 조건보다 낮은 강도로 달릴 경우 더 많은 시간을 달려야 한다 (Ryu, 2013).

그동안 오래 달리기로 인한 피로 상태에서 손상을 야기하는 운동 역학적 비정상상을 판단할 목적으로 운동학적 및 운동 역학적 요인들과의 관계를 규명해 잠재적 손상 발생을 예측하고 손상을 진단해 손상을 이해하기 위한 수단으로 몇몇 연구가 수행되고 있으나 (Bruggemann & Arndt, 1994; Bruggemann, Arndt, Kersting, & Knicker, 1995; Dierks, Davis, & Hamill, 2010; Gheluwe, Kopriva, & Madsen, 1995; Hunter & Smith, 2000; Jean-Benoit, Pierre, & Guillaume; 2011; Nicol, Komi, & Marconnet, 1991; Paavolainen, Hakkinen, Nummela, & Ruskoh, 1995; Ryu, 2013; Ryu, 2014; Siler & Martin, 1991; Verbitsky, Mizrahi, Voloshin, Treiqer, & Elisakov, 1998; Williams, Snow & Agruss, 1991), 달리기 시 경골 스트레스 골절의 원인으로 알려진 자유 토크를 피로 상태에서 살펴 본 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이에 본 연구는 달리기 초기인 5분 달린 직후와 피로상태인 125분 달린 직후 절대 자유 토크 변인을 관찰해 비교하는데 그 목적을 두었다. 연구 목적을 실현하기 위해 지지국면 시 제동력 피크에서 자유토크 크기, 지지국면 시 시간 함수에 대한 자유토크 크기의 순 면적인 충격량, 지지국면 시 자유 토크의 최대 절대 값에 관심을 가졌다.

본 연구에서 분석된 변인들의 차이는 피로에 따른 결과로 가정해 해석했다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구의 대상자는 개인의 선호 속도로 최소한 2시간 정도 달릴 수 있는 후속 착지 형을 지닌 신체 건강한 20대 15명으로 선정하였으며, 이들의 신체적 특성과 달리기 선호 속도 등은 아래 표와 같다(Table 1).

Table 1. Characteristics of subjects

Age (yrs.)	Height (cm)	Mass (kg)	Preferred run speed (m/s)
22.0±2.1	175.8±4.3	66.1±5.1	2.5±0.1

2. 실험 절차

모든 대상자들은 그들의 선호 속도로 지면반력 판이 장착된 트레드밀 (instrumented dual belt treadmills, Bertec, USA)을 달릴 때 샘플링을 1,000 Hz로 대상자의 오른 발 착지에 대해 10스트라이드 (20스텝)에 대해 지면반력 6성분들 (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z)을 수집했다. 본 실험에 참여한 대상자들은 운동화 차이로 인한 자료의 편차를 줄이기 위해 동일한 제품의 운동화 (Lunareclipse2, Nike, USA)를 신고 2시간 10분을 달렸다. 달리기 시 피로를 감지하는 것은 개인차에 따라 다르지만 일반적으로 최대 산소 섭취량의 70% 수준 혹은 최대 심박 수의 75-80% 수준에서 달렸을 때 1시간 후에 피로감을 느낀다는 선행연구에 따라 (Ryu, 2001; 2013; Wilmore & Costill, 1994) 본 연구에서는 완전한 피로 상태를 고려해 2시간 이상 달리기를 실험 조건으로 설정했다 (Ryu, 2013). 자료 수집은 대상자들이 인지하지 못한 상태에서 달리기 시작 5, 125분 바로 경과 후에 수집했다. 자료 수집 전 모든 대상자들은 충분한 워밍업을 가져 트레드밀 달리기에 익숙하도록 했다.

3. 자료 분석 및 처리

본 연구에서 실험실 좌표는 오른손 법칙에 따라 주자의 전진 방향을 +y, 위 방향을 +z, 이 두 방향을 크로스 (cross)한 오

른쪽 방향을 +x로 설정했으며, 발이 지면에 접촉하는 순간 내전과 외전 구분 없이 절대 자유토크 값을 활용했다. 자유 토크를 계산하기 전 3방향의 힘과 3축의 모멘트 성분의 모든 지면반력 자료에 대한 신호를 필터링하기 위해 차단 주파수를 산출했다. 차단 주파수는 신호의 PSD (power spectrum density)의 누적이 99.9%까지의 최대 주파수로 결정했다 (Ryu, 2013; Stergiou, Giakas, Byrne, & Pomeroy, 2002). 다음으로 신호에 내재된 직류 성분을 제거하기 위해 신호의 처음 5점들을 평균해서 모든 신호 값으로부터 이 평균값을 빼 주었다 (Ryu, 2013). 분석 범위는 발이 지면에 닿는 순간부터 이지 순간까지의 지지국면으로 한정했으며, 이때 지지국면 범위는 수직 지면반력 기준으로 착지 순간 5 N이상부터 이지 순간 5 N 미만까지로 설정한 후 이 국면에 Rectangular window를 적용해 자료를 정리했다 (Ryu, 2013). 이들 수직 지면반력의 신호에 맞춰 나머지 5 성분들에 대한 지면반력 신호의 지지국면을 정했다. 정리된 지면 반력 신호로부터 발과 지면 사이의 마찰로 인한 수직축에 작용하는 자유토크를 계산했다. 자유토크는 지면반력 중심에서 수직축에 대해 작용하는 모멘트 (M_z)의 한 성분과 압력 중심을 통해 작용하는 합 전단력으로 인한 모멘트 (Holden & Cavanagh, 1991) 즉 압력판 출력 값으로부터 얻은 수직 모멘트에 대한 이들 두 성분의 역할을 기술한 식을 이용해 자유 토크를 산출했다 (Milner, Davis, & Hamill, 2006).

$$FT = M_z - (CoP_x \cdot F_y) + (CoP_y \cdot F_x)$$

$$CoP_x = -M_y / F_z, \quad CoP_y = M_x / F_z$$

여기서, M_z 는 z 축에 대한 모멘트, CoP_x 는 압력 중심의 x 좌표, F_y 는 y방향에서 지면 반력, CoP_y 는 압력 중심의 y 좌표, F_z 는 z방향에서 지면 반력, M_x 는 x축에 대한 모멘트이다. CoP_y 는 달리기 속도와 샘플 율을 고려해 보정했다.

이를 테면 본 연구에서 샘플 율은 1,000Hz로 설정했으므로 달리기 속도가 2.5m/s라면 각 샘플 점에 0.0025m 씩 배수로 더해주었다.

자유 토크 크기에 대한 대상자들 간에 체중과 신장의 효과 차를 줄이기 위해 자유 토크는 체중과 신장에 의해 표준화해 무 차원으로 처리한 후 지지국면 시 체동력 피크에서 자유토크 크기, 전 지지국면 시 시간 함수에 대한 자유토크를 적분한 절대 충격량, 지지국면 시 절대 최대 자유 토크 값을 계산했다. 대상자별로 5, 10 스트라이드에 대해 모든 변인을 산출해 이를 평균했고, 자유 토크자료는 표준화를 통해 도식화했다.

산출된 변인에 대해 피로 상태를 판단하는 달리기 시간 조건 간의 차이를 분석하기 위해 반복측정 일원 변량분석 (repeated measure one-way ANOVA)을 실시했으며, 통계적 유의수준은 모든 비교에서 $\alpha = .05$ 로 설정했다.

III. 결과

전술한 방법에 의거 오래달리기로 인한 피로 상태에서 절대 자유 토크 변인을 관찰하고자 분석한 결과 달리기 시간별 자유 토크 변인들과 시간 간 통계적 검증 결과는 <Table 2>와 같다. 또한 달리기 시 지지국면에 대해 표준화한 시간 함수에서 자유 토크의 크기의 그래프는 <Figure 1, 2 >와 같다. 이들 결과에 의하면 달리기 지지국면 시 시간 함수에서 각 개인의 수직 지면 반력 신호의 수동 크기 (passive magnitude)가 최대 피크 순간 대상자들의 자유 토크는 5분 달린 직후가 평균과 표준편차가 0.067 ± 0.038 로 125분 달리기 직후 0.037 ± 0.026 보다 통계적으로 유의하게 큰 값을 보였다 ($p<.05$). 지지국면 시 자유 토크의 최대 절대 값을 나타내는 절대 자유 토크는 5분 달리기 직후가 평균과 표준편차가 0.153 ± 0.026 로 125분 달리기의 0.140 ± 0.041 보다 약간 큰 값을 보였으나 두 조건 간 통계적 유의한 차이는 확인되지 않았다. 지지국면 시 자유토크 곡선 아래 순 면적을 시간 함수로 적분한 충격량 변인은 5분 달리기 직후가 0.017 ± 0.004 로 125분 달리기 직후 0.016 ± 0.004 보다 평균적으로 약간 큰 값을 보였으나, 절대 자유토크와 같이 달리기 시간 조건 간 통계적 유의한 차이는 확인되지 않았다.

Table2. Variables of free torque and their static tests between running time conditions at support phase

Variables Conditions	Free torque at passive force peak	Absolute free torque	Impulse(sec)
5 min. 125 min.	0.067 ± 0.038 0.037 ± 0.026	0.153 ± 0.026 0.140 ± 0.041	0.017 ± 0.004 0.016 ± 0.004
F value p values	5.92 0.02	1.32 0.25	1.17 0.28

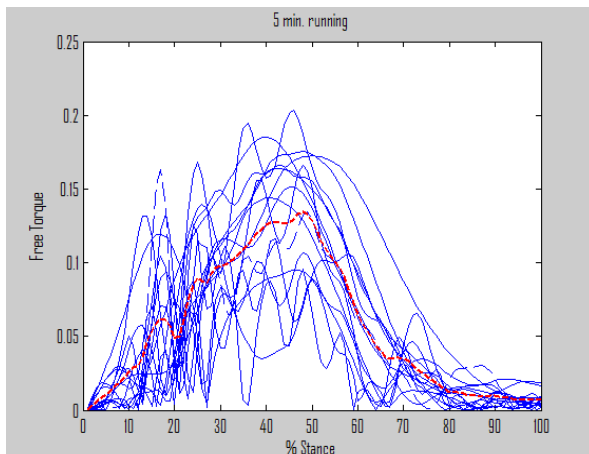


Figure 1. Normalized free torques at 5 minutes running .

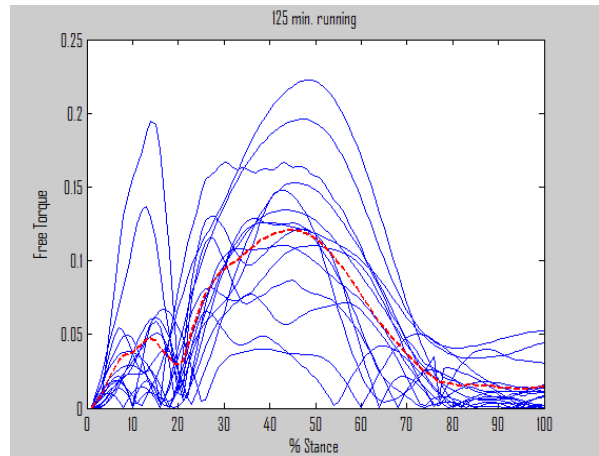


Figure 2. Normalized free torques at 125 minutes running.

IV. 논의

이 연구에서는 달리기 시간 경과에 따른 피로 상태에서 이 동운동 시 발생하는 자유토크의 변화를 규명하고자 했다. 본 연구에 분석된 자유 토크의 변인들로는 제동 순간 절대 자유 토크, 지지국면의 절대 최대 자유 토크, 지지 국면의 시간함수와 자유 토크 적 (積)인 충격량이다. 본 연구 결과 제동력이 가장 큰 순간 절대 자유토크는 개인 간의 다소 큰 편차는 존재하지만 피로 상태가 가중되지 않은 5분 달리기 직후가 피로에 노출된 125분 달린 직후보다 큰 값을 보여 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 그러나 지지국면의 절대 최대 자유 토크, 지지 국면의 시간함수와 자유토크 적(積)인 충격량은 공히 5분 달리기 직후가 125분 달린 직후 보다 컸지만, 통계적 유의한 차이는 확인되지 않았다.

달리기 지지국면의 제동 순간 전단력과 모멘트, 자유 토크는 손상을 예측하는 중요한 지표이다 (Milner, Davis, & Hamill, 2006). 오래달리기에서 Jean-Benoit, Pierre, & Guillaume (2011)와 Ryu (2013)는 피로가 가중된 상태에서 제동 순간의 충격력 크기는 피로하지 않은 상태의 충격력과 비교해 통계적으로 유의한 차이가 없다고 주장했다. Finni, Kyrolainen, Avela, & Komi (2003)들과 Ryu (2013)는 또한 좌우, 전후 방향으로 작용하는 전단력은 달리기 시간 경과가 증가한 피로 상태에서 유의한 차이가 없다고 주장했다. 이런 선행연구 결과에 기초해 볼 때 125분 달리기 직후의 자유 토크가 적게 나타난 것은 이 순간 전진방향과 좌우 방향에서 작용하는 모멘트가 커져 이로 인해 압력중심(cop)이 크게 변했기 때문에 자유 토크 값이 떨어진 것이 아닌가, 판단된다. 또 다른 추측은 충격력 피크가 감소 (Gerlach, et al., 2005)해 압력 중심이 커 전체적인 자유 토크가 적게 작용한 것으로 보인다.

이에 관한 구체적인 실증적 판단을 위해 향후 자유 토크와 전후 및 좌우 방향에 작용하는 모멘트, 압력 중심과의 관계를 종합적으로 살펴볼 연구의 필요성이 요구된다. 또한 달리기 시 운동학적 변인들은 신체의 정상적인 정렬을 변경 (Milner et al., 2006)시켜 스트레스 골절을 발생시키는데 중요한 역할을 하므로 두 조건 간 제동력 순간 자유 토크의 차이를 규명하기 위해서는 신체의 관절과 분절을 관찰해 자유 토크 변화의 원인을 규명할 필요성이 있다고 판단된다.

앞서 기술한 바와 같이 달리기는 지구력과 근력 등 체력증진과 같은 긍정적인 효과가 있지만, 매년 19-79%의 주자들이 손상에 시달리는 것으로 보고되고 있다 (Hasegawa, Yamauchi, & Kraemer, 2007; van Gent et al., 2007). 달리기 손상을 야기하는 위험 요소들은 손상 원인과 관련된다. 달리기로 인해 발생하는 손상중 하나인 스트레스 골절은 주자들에게서 흔한 문제이며 매년 6-14%의 발생율이 보고되고 있다 (Taunton et al., 2002). 달리기 시 경골능은 비틀림을 겪는데 이 비틀림의 원인은 달리기 시 발과 지면 사이에 작용하는 자유 토크 때문이다. 자유 토크는 운동의 수평면에 전신의 각운동량을 조절하기 위해 지면에 주자의 움직임 작용으로 생성된 결과이다 (Willwacher et al., 2015). 이렇게 발생한 자유 토크는 경골에 비틀림 부하로 전이되어 통증과 손상을 일으키는 위험 요소로 작용한다 (Milner et al., 2006; Willwacher et al., 2015). 달리기 시 경골은 가장 쉽게 스트레스 골절에 노출되는 때로 모든 스트레스 손상의 35-56%를 차지하는 것으로 알려졌다 (Romani et al., 2002). 선행 연구에 의하면 경골 스트레스를 겪는 집단은 정상인 집단에 비해 경골에 작용된 비틀림 부하인 자유토크가 큰 것으로 보고 되고 있다 (Milner et al., 2006). 또한 경골 스트레스 골절 집단은 스트레스 골절 재 발율이 36%에 육박하는 것으로 알려졌다 (Hauret et al., 2001). Pohl et al. (2008)은 달리기 시 발생하는 자유 토크는 경골 스트레스 골절의 83%의 병력을 정확하게 추정할 수 있기 때문에 달리기 시 경골 스트레스의 위험 요소는 자유토크라고 주장했다. 이와 같이 달리기 시 경골에 부하를 가중시켜 골절을 발생하는 역학적 변인으로 자유토크가 관여하는 것으로 알려졌다.

오래 달리기와 같은 반복적인 활동은 과다 사용 손상에 노출되기 쉽다. 오래 달리기 시 잠재적 손상 증가는 주로 피로가 가중된 달리기 후반에 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Whiting & Zerinicke, 1998). 즉 오래 달리기에서 거리의 증가와 시간의 경과에 피로 상태를 야기하므로 손상이 발생할 잠재적 가능성이 크다 할 수 있다 (Brill & Macera, 1995). 따라서 충분한 거리와 시간을 확보한 피로 상태까지 달린 후 손상의 위험 변인을 관찰하는 것은 손상에 취약한 주자들에게 이들 위험 변인을 조절해 손상을 예방할 수 있는 방안을 제공하는 의미 있는 작업이라 할 수 있다. 피로 상태에서 손상의 위험

요소를 살펴보는 것은 고로 오래 달리기 시 잠재적 손상을 줄이기 위한 시도라 할 수 있다 (Whiting & Zerinicke, 1998). 앞서 기술한 바와 같이 오래 달리기 시 경골의 비틀림에 영향을 미치는 자유토크를 피로 상태에서 관찰된 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구 결과 통계적으로 유의한 관계는 확인되지 않았지만 지지국면 시 절대 최대 자유토크가 125분 달리기 직후 약 9% 정도 감소된 것은 수직 지면 반력의 능동 성분 (active component) 감소에 기인한 것으로 판단된다 (Christina, White, & Gilchrist, 2001; Nicol et al., 1991; Ryu, 2013). 오래 달리기 시 손상 발생이 빈번한 피로 상태에서 경골 스트레스 골절을 야기하는 자유토크를 관찰한 본 연구에서 제동 순간 자유 토크는 피로 상태에서 감소했지만, 지지국면 절대 최대 자유토크와 운동량에서는 변화가 없었다. 따라서 경골 스트레스에 영향을 미치는 자유토크의 부정적 효과는 단발적 피로 상태에서는 확인되지 않았다. 본 연구의 결과로 볼 때 달리기 시 경골 스트레스 골절에 영향을 미치는 자유토크는 각 주자의 선천적인 문제이지 피로와 같은 후천적인 조건에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

V. 결론 및 제언

본 연구는 트레이드 밀 달리기 시간 경과에 따른 피로가 자유 토크 성분들에 미치는 영향을 관찰하고자 하지에 손상 위험이 없는 후속 착지 유형 20-30대 남성 15명을 선정해 분석했다.

그 결과 달리기 시 지지국면에서 절대 최대 자유 토크와 충격량은 달린 직후 5분이 달린 직후 125분보다 약간 큰 값을 보였으나 통계적 유의차는 보이지 않았으나, 착지 순간 제동력이 최대인 순간 절대 자유토크는 5분 달린 직후가 달리기 시간이 경과한 125분 달린 직후보다 커 달리기 2시간 이후 감소하는 경향이 유의하게 나타났다 ($p < .05$). 이런 결과를 통해 오래달리기로 인한 피로는 자유 토크 성분에 영향을 미쳐 경골 스트레스 골절의 잠재적 손상을 유발하는데 크게 작용하지 않는 것으로 확인되었다.

향후 이와 관련된 연구를 수행하기 위해서는 달리기 피로 상태에서 압력 중심 및 하지의 운동학과 자유 토크와의 관계를 분석할 필요성을 제언하며, 단발적인 피로 조건이외 피로가 장기적으로 축적된 상태에서 자유토크 성분들을 관찰할 필요성 또한 제기하고자 한다.

참고문헌

- Asmussen, E.(1979). *Muscle fatigue*. Medicine and Science in Sports, 11(4), 313-321.
- Brill, P. A. & Macera, C. A.(1995) The influence of running patterns on running injuries. *Sports Medicine*. 20, 365-368.
- Brüggemann, G. P. & Arndt, A. (1994). *Fatigue and lower extremity function*. In *Proceedings of the First Symposium on Functional Footwear*. Calgary, 4-5.
- Brüggemann, G. P., Arndt, A., Kersting, U. G., & Knicker, A. J. (1995). Influence of fatigue on impact force and rearfoot motion during running. *Proceedings of International Society of Biomechanics*, 132-133.
- Collins, J. & Whittle, M. W. (1989). Impulsive forces during walking and their clinical implications, *Clinical Biomechanics*, 4, 179-187.
- Christina, K. A., White, S. C., & Gilchrist, L. A. (2001). Effect of localized muscle fatigue on vertical ground reaction forces and ankle joint motion during running. *Human movement science*. 20, 257-276.
- Dierks, T. A., Davis, I. S., & Hamill, J. (2010). The effects of running in an exerted state on lower extremity kinematics and joint timing. *Journal of Biomechanics*, 43(5), 2993-2998.
- Finni, T., Kyrolainen, Avela, J., & Komi, P. V. (2003). Maximal but not submaximal performance is reduced by constant-speed 10-km run. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 43(4), 411-417.
- Gheluwe, B. V., Kopriva, N., & Madsen, C. (1995). Rearfoot motion in running prior to volitional exhaustion. *Proceedings of XV Congress of International Society of Biomechanics*, 958-959.
- Gerlach, K. E., White, S. C., Burton, H. W., Dorn, J. M., Leddy, J. J., & Horvath, P. J. (2005). Kinetic changes with fatigue and relationship to injury in female runners. *Medicine and Science in Sports*. 37(4), 657-663.
- Hasegawa, H., Yamauchi, T., & Kraemer, W. J. (2007). Foot strike patterns of runners at the 15km point during an elite-level half marathon, *Journal of strength and conditioning Research*. 21(3), 888-893.
- Hauret, K. G., Shippey, D. L., & Knapik, J. J. (2001). The physical training and rehabilitation program: duration of rehabilitation and final outcome of injuries in basic combat training. *Military Medicine*. 166, 820-826.
- Hunter, I. & Smith, G. A. (2000). Effect of fatigue on preferred and most economical stride frequency in treadmill running. *Proceedings of XIth Congress of the Canadian Society for Biomechanics*, 43.
- Holden, J. P. & Cavanagh, P. R. (1991). The free moment of ground reaction in distance running and its changes with pronation. *Journal of Biomechanics*, 24, 887-897.
- Ida, B., Steef W. B., Koen A. P. M., Lemmink, Willem van Mechelen, M. D., & Ron L. D. (2010). Predictors of running-related injuries in Novice runners enrolled in a systematic training program, *The American Journal of Sports Medicine*, 38(2), 273-280.
- Jean-Benoit, M., Pierre, S., & Guillaume, Y. H. (2011). Changes in running kinematics, kinetics, and spring-mass behavior over a 24-h run. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(5), 829-836.
- Kang, H. M., Kim, D. H., Seo, J. R., Yi, Y. W., & Park, S. K. (2008). Muscle fatigue compensating exoskeleton. *The Korean Society of Mechanical Engineers*. 5, 191-192
- Korean society of exercise physiology. (2014). *Exercise physiology*, Hannibook, 123.
- Lun V, Meeuwisse W. H., Stergiou P., & Stefanyshyn D. (2004). Relation between running injury and static lower limb alignment in recreational runners. *British journal of Sports medicine*. 38, 576-580.
- Milner, C. E., Davis, I. S., & Hamill, J. (2006). Free moment as predictor of tibial stress fracture in distance runners. *Journal of Biomechanics*. 39, 2819-2825.
- Nicol, C., Komi P. V., & Marconnet, P. (1991). Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance changes in muscle force and stiffness characteristics. Scandinavian. *Journal of Medicine & Science in Sports*, 10-17.
- Paavolainen, L., Hakkinen, K., Nummela, A., & Ruskoh, (1995).

- Effects of fatigue on stride parameters in endurance athletes with different distance running performance capability. *Proceedings of XV Congress of International Society of Biomechanics*.
- 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, 1160-1165.
- Romani, W. A., Gieck, J. H., Perrin, D. H., Saliba, E. N., & Kahler, D. M. (2002). Mechanisms and management of stress fractures in physically active persons. *Journal of Athletic Training*, 37, 306-314.
- Ryu, J. S. (2001). Fatigue effects on biomechanical parameters during a prolonged run. *The Korean Journal of Physical Education*, 40(4), 1011-1025.
- Ryu, J. S. (2013). Effects of a prolonged-run-induced fatigue on the ground reaction force components. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 23(3), 225-233.
- Ryu, J. S. (2014). Variability of GRF components between increased running times during prolonged run. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 24(4), 359-365.
- Siler, W. L., & Martin, P. E. (1991). Changes in running pattern during a treadmill run to volitional exhaustion: Fast vs slow runners. *International Journal of Sports Biomechanics*, 7, 12-28.
- Stergiou, N., Giakas, G., Byrne, J. E., & Pomeroy, V. (2002). Frequency domain characteristics of ground reaction forces during walking of young and elderly females. *Clinical Biomechanics*, 17, 615-617.
- Taunton, J. E., Ryan, M. B., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Lloyd-Smith, D. R., & Zumbo, B. D. (2002). A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries. *British Journal of Sports Medicine* 36, 95-101.
- Taunton, J. E., Ryan, M. B., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Lloyd-Smith, D. R., & Zumbo, B. D. (2003). A prospective study of running injuries: the Vancouver Sun Run "In Training" clinics. *British journal of Sports medicine*. 37:239-244.
- van Gent, R. M., Siem, D., van Middlekoop M., van Os A. G., Bierma-Zeinstra, A. M. A., & Koes B. W. (2007). Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review. *British journal of Sports medicine*. 41, 469-480
- Verbitsky, O., Mizrahi, J., Voloshin, A., Treiqer, J., & Elisakov, (1998). Shock transmission and fatigue in human running. *Journal of Applied Biomechanics*, 14, 301-311.
- Williams, K. R., Snow, R., & Agruss, C. (1991). Changes in distance running kinematics with fatigue. *International Journal of Sports Biomechanics*, 7, 138-162.
- Willwacher, S., Fischer, K., Goetze, I., Hamill, J., Rohr, E., & Bruggemann, G. P. (2015). Free moment patterns, transversal plane joint loading and injury risk in running. *Footwear Science*. 7(S1), s124-126.
- Wilmore, J. H. & Costill, D. L. (1994). *Physiology of sport and exercise*. Human Kinetics, 110-522.
- Whiting, W. C. & Zerinicke, R. F. (1998). *Biomechanics of Musculoskeletal injury*. Champaign,IL. Human Kinetics, 119.