

오래 달리기로 인한 피로가 지면반력 성분에 미치는 영향

류지선¹

¹한국체육대학교 생활체육대학 운동건강관리학과

Effect of a Prolonged-run-induced Fatigue on the Ground Reaction Force Components

Ji-Seon Ryu¹

¹Department of Health and Exercise Science, College of Lifetime Sport of Korea National Sport University, Seoul, Korea
Received 21 July 2013; Received in revised form 27 August 2013; Accepted 12 September 2013

ABSTRACT

The purpose of this study was to estimate the potential injury via analyzing ground reaction force components that were resulted from a prolonged-run-induced fatigue. For the present study, passive and active components of the vertical ground reaction force were determined from time and frequency domain. Shear components of GRF also were calculated from time and frequency domain. Twenty subjects with rear foot contact aged 20 to 30, no experience in injuries of the extremities, were requested to run on the instrumented tread-mill for 160 minutes at their preference running speed. GRF signals for 10 strides were collected at 5, 35, 65, 95, 125, and 155 minute during running. In conclusions, there were no significant difference in the magnitude of passive force, impact load rate, frequency of the passive and active components in vertical GRF between running times except the magnitude of active force ($p < .05$). The magnitude of active force was significantly decreased after 125 minute run. The magnitude of maximum peak and maximum frequency of the mediolateral GRF at heel strike and toe-off have not been changed with increasing running time. The time up to the maximum peak of the anteroposterior at heel-strike moment tend to decrease ($p < .05$), but the maximum peak and frequency of that at heel and toe-off moment didn't depend significantly on running time.

Keywords: Ground Reaction Force, GRF, Running

I. 서 론

인간 이동운동 시 신체는 발이 지면에 닿는 때 순간마다 수직, 좌우, 전후 방향별로 반복적인 충격을 받는다. 이동운동 시 충격의 수직 방향 성분은 두 가지 피크를 보인다. 첫 번째 나타나는 수직 피크를 충격력(impact force) 혹은

수동력(passive force)이라 하며, 두 번째 나타나는 수직 피크를 능동력(active force)이라 한다. 후자의 능동력은 관절 근(articular muscle)의 수축에 의해 발생되지만, 전자의 수동적인 힘은 인대, 건, 및 근육의 비 능동 요소(inactive component) 등에 의해 발생한다(Hatze, 1997). 달리기 시 또 다른 충격을 살펴볼 때 수동력 피크와 이 피크가 발생한 시간으로 나눈 부하율을 이용한다. 수직 방향에서 일어나는 충격뿐만 아니라 크기는 작고 불규칙한 파형을 보이는 좌우, 전후 방향에서 일어나는 충격 또한 정량화되어 충격의 영향을 파악한다. 충격의 크고 적음은 이동 속도, 신발의 유형, 지면의 특성, 체중과 같은 요소에 의해 차이가 있지만(Cavanagh & LaFortune, 1980; Frederick & Hagy, 1986; Nigg, Bahlsen, Luethi, & Stokes, 1987;

위 논문은 2012년 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2012S1A5A2A01018284).
Corresponding Author : Ji-Seon, Ryu
Department of Health and Exercise Science, College of Lifetime Sport of Korea National Sport University, 138-763, 1239, Yangjae, Songpa-gu, Seoul, Korea
Tel : +82-2-410-6822 / Fax : +82-2-410-6927
E-mail : jiseon@knsu.ac.kr

Whittle, 1999), 이는 신체에 영향을 미친다.

달리기 시 신체에 전달되는 충격은 상해를 유발한다는 부정적인 관점과 신체 근 골격계 강화에 도움을 준다는 긍정적인 측면의 연구로 대별된다. 퇴행성 관절염과 허리 통증 등의 유발은 충격의 결과라 여겨졌으며(Radin, Paul, & Rose, 1972; Voloshin & Wosk, 1982), 달리기 시 다리의 압박 상태와 보철 환자의 관절 이완, 관절의 노쇠 현상 등은 모두 충격의 영향이라고 간주되었다(Brggemann, Arndt, Kersting, & Knicker, 1995; Collins & Whittle, 1989; Miller, Pate, & Burgess, 1988). 보다 최근의 연구에서 달리기 충격은 잠재적 상해를 유발하는 결정적인 요인이라고 보고되고 있다(Hreljac, Marshall, & Hume, 2000; Milner, Ferber, Pollard, Hamill, & Davis, 2006; Pohl, Hamill, & Davis, 2009). 특히 달리기 시 좌우 충격에 의해 결정되는 전두면과 횡단면 무릎 관절 모멘트 크기(Stefanyshyn, Stergiou, Lun, & Messuwisse, 2001)와 무릎 외전 충격은 통증과 상해 유발에 결정적인 요인이라고 보고되고 있다. 한편 Stefanyshyn, Stergiou, Nigg, Lun, & Meeuwisse (2000) 같은 연구자들은 주파수 분석을 통해 수직 충격력은 뼈를 건강하게 유지시키고 발달시키는 데 긍정적인 영향을 미치기 때문에 상해와는 관계가 없다고 주장했지만, 달리기 시 충격과 상해는 밀접한 관계가 있다고 주장한 연구가 많이 보인다. 또한 최근에는 지면반력의 수직 성분 중에 하나로 정량화된 충격력뿐만 아니라 지면반력의 수평 충격이 상해 유발에 일부 영향을 미치고 있다는 연구도 보인다(Stefanyshyn, Stergiou, Meeuwisse, Worobets, & Lun, 2006). 이등 운동 시 상해를 야기하는 또 다른 요인은 피로이다. 피로란 근육이 더 이상 동일한 정도의 수축 신호에 반응하지 않는 것을 의미한다(Kang, Kim, Seo, Yi, & Park, 2008). 피로는 근력, 협응성, 정신적 주의와 집중을 해치기 때문에 상해의 가능성을 증가시키며, 이는 주로 운동 후반에 나타난다(Collins & Whittle, 1989). 오래 달리기의 피로는 시간이나 혹은 거리를 증가시키면 피로가 가중된다. 피로 상태를 판단하는 것은 개인의 건강 상태에 따라 다르지만, 일반적으로 최대 산소 섭취량의 70% 수준 혹은 최대 심박수의 75-80% 수준에서 달렸을 때 1시간 전후에서 피로의 느낌이 급격히 변화하는 것으로 보고되고 있다(Wilmore & Costill, 1994). 따라서 오래 달리기로 인한 피로 상태에서 신체를 관찰하기 위해서는 적어도 위에서 적시한 운동 강도로 최소한 1시간 이상을 달려야 한다. 달리기로 인한 피로 상태에서 달리기로 인해 발생한 충격이 달리기 시간 증가에 따라 어떻게 변화하는지 살펴보는 것은 잠재적 상해 유발을 예측하는 임상학적 측면뿐만 아니라 운동 수행 측면에서도 통찰력을 제공하는 일이라 하겠다.

그동안 오래 달리기로 야기된 피로와 관련된 연구는 주

로 운동학적 분석과 운동역학적 분석으로 대별해 이루어졌다. 운동학적 연구로는 피로 상태에서 달리기 시 시공간 요인들을 분석한 연구(Hunter & Smith, 2000; Nicol, Komi, & Marconnet, 1991; Paavolainen, Hakkinen, Nummela, & Ruskoh, 1995), 신체 분절 및 관절의 변화를 살펴본 연구(Brggemann & Arndt, 1994; Brggemann et al., 1995; Dierks, Davis, & Hamill, 2010; Elliot & Ackland, 1981; Gheluwe, Kopriva, & Madsen, 1995; Hamill, Freedson, Boda, & Reichsman, 1988; Siler & Martin, 1991; Williams, Snow & Agruss, 1991) 등 많은 연구자들이 운동학적 분석에 관심을 가졌다. 운동역학적 요인을 분석한 연구로는 무산소성 역치 수준의 속도로 30분간 달리기 상태에서 충격 쇼크파를 분석한 연구(Verbitsky, Mizrahi, Voloshin, Treiqer, & Elisakov, 1998) 등이 이루어졌다. 또한 수직 지면반력기를 장착한 트레이드 밀(instrumented treadmill)을 이용해 3m/s의 속도로 45분 달리기 후 피로에 인한 충격력 피크 연구(Brggemann et al., 1995)와 보다 최근에 24시간 달리기에서 수직 지면반력의 수동 및 능동 성분과 하지 강성을 관찰한 연구(Jean-Benoit, Pierre, & Guillaume, 2011) 등이 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 오래달리기로 인한 피로한 상태에서 운동학적 및 역학적 요인들과의 관계를 분석해 상해와의 관계를 규명하기 위한 수단으로 많은 연구가 수행되고 있으나, 대부분의 연구가 운동학적 요인 분석에 치중되었으며, 수행된 몇 편의 운동역학적 연구도 피로를 유발한 운동 시간 강도가 1시간 이내이거나, 짧은 거리에서 이루어져 완전한 피로 상태에서 상해를 예측하는 변인 분석이 이루어졌다고 보기에는 미흡한 것으로 판단된다. 또한 변인 분석 방법도 지면반력의 수직 성분에만 국한되어 선행 연구에서 제기되었던 지면반력의 수평 성분과 상해와의 관계를 규명하는 데는 한계가 있다. 뿐만 아니라 분석된 요인도 단지 시간 함수에서 살펴보아 시간 함수에서 밝혀지지 않는 특성(Nicholas, Giannis, Jennifer, & Valerie, 2002)을 파악하는 데는 미흡한 실정이다. 따라서 스포츠 상해의 위험 요인으로 알려진 주파수 변인(Nigg & Bobbert, 1990) 분석이 요구되며, 특히 상해와 관련 있는 전두면과 횡단면 무릎 모멘트에 간접적으로 영향을 미치는(Stefanyshyn, Stergiou, Lun, et al., 2001) 지면반력의 수평 성분 분석과 근의 수축 상태를 간접적으로 평가하는 능동력에 대한 연구의 필요성이 요구된다.

이에 본 연구는 오래달리기 시 잠재적 상해를 예측하고자 충격의 지표인 지면반력 성분만을 시간 경과에 따라 관찰했다. 이를 위해 다음과 같은 구체적인 목적에 특별한 관심을 갖는다. 첫째, 달리기 시간 증가는 수직 지면반력의 능동 성분과 수동 성분을 변화시키는지 시간 및 주파수 분석을 통해 관찰하고, 둘째, 달리기 시간 증가는 좌우

Table 1. Characteristics of subjects

Age(yrs)	Height(cm)	Weight(kg)	Running Speed(m/s)
23.9±4.5	176.0±5.5	68.5±5.8	2.5±0.2

및 전후 지면반력 성분을 변화시키는지 시간 및 주파수 분석을 통해 살펴보고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상자

본 연구에 참여한 대상자는 실험에 동의한 자로서 하지에 상해 경험이 없으며, 자신의 선호 속도로 적어도 2시간 40분 이상을 뛰어본 경험이 있는 20-30대 중에 후속 차지형 20명을 선정했으며, 이들의 특징은 <Table 1>과 같다.

2. 실험 절차

본 연구에 참여한 모든 대상자들은 충분한 워업(warm-up)을 가진 후 각 개인의 선호 속도로 <Figure 1>과 같이 두 대의 지면반력기가 장착된 트레드밀(instrumented dual belt treadmills, Bertec, USA) 위에서 160분 동안 가장 편안하고 자연적인 달리기를 실시했다.

각 대상자의 달리기 선호 속도는 일정한 트레드밀 속도에서 증가와 감소를 임의적으로 반복해 각 대상자가 가장 편안하다고 느끼는 달리기 속도를 선정했으며, 이를 3번 반복해 평균 속도를 취했다. 대상자가 달리는 동안 그들이 인지하지 못한 상황에서 5, 35, 65, 95, 125, 155분 순간 최적의 지면반력 분석에 필요한 시도 수인 10 스트라이드에 대해 지면반력 신호를 수집했다(Hamill & MacNiven, 1990). 자료수집 샘플링 율은 1000 Hz로 설정했으며, 운동화는 모든 대상자들에게 동일한 쿠셔닝(cushioning) 지수를



Figure 1. Instrumented dual belt treadmills

가진 제품(Lunareclipse2, Nike, USA)이 활용되었다. 또한, 지면반력의 캘리브레이션(calibration)은 Bertec사에서 채널별, 렌지(range)별로 사전에 측정된 측정값을 이용했다.

3. 자료 처리

우선 실험을 통해 얻은 방향별 지면반력의 신호를 필터링하기 위해 차단 주파수를 산출했다. 차단 주파수는 신호의 PSD (power spectrum density)의 누적이 99.9%까지의 대역에서 최대 주파수로 선정했다(Stergiou, Giakas, Byrne, & Pomeroy, 2002). 다음으로 신호에 내재된 bias를 제거하기 위해 신호의 처음 10점들을 평균해서 모든 신호 값으로부터 이 평균값을 빼 주었다. 분석 범위는 발이 지면에 닿는 순간부터 이지 순간까지의 지지 국면으로 한정했으며, 이때 지지국면 범위는 수직 지면반력 기준으로 착지 순간 5 N이상부터 이지 순간 5 N 미만까지로 설정한 후 이 국면에 Rectangular window를 적용해 데이터를 정리했다(Ryu, 2010). 이들 수직 지면반력의 신호에 맞춰 전후, 좌우 방향에 대한 지면반력 신호의 지지국면을 정했다. 이렇게 정리된 데이터로부터 수직 지면반력 신호는 4차 디지털 저역 통과 필터법을 적용해 능동 성분(active portion)을, 고역 통과 필터법을 적용해 수동 성분(passive portion)을 분리했다(Figure 2). 이 때 차단 주파수는 앞서 선정된 최대 주파수를 이용했다. 분리된 수직 지면반력 두 성분과 전후, 좌우 지면반력의 이지 이후의 신호는 Zero padding을 2048점까지 적용 샘플에서 스윙 국면의 데이터

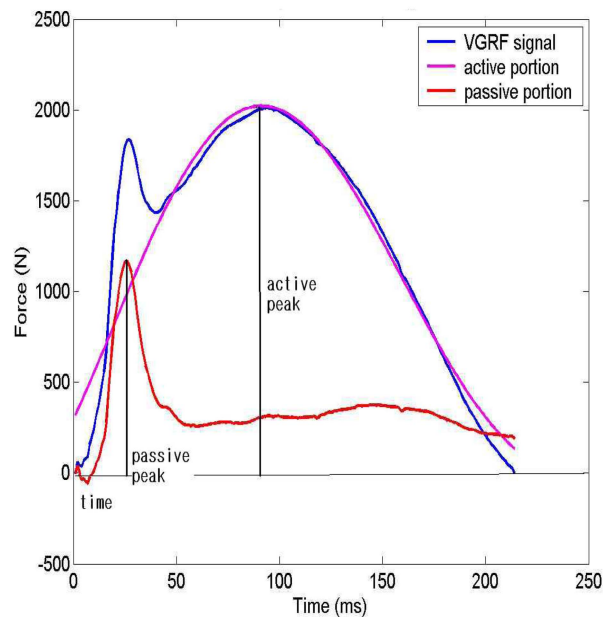


Figure 2. Active portion and passive portion of vertical ground reaction force

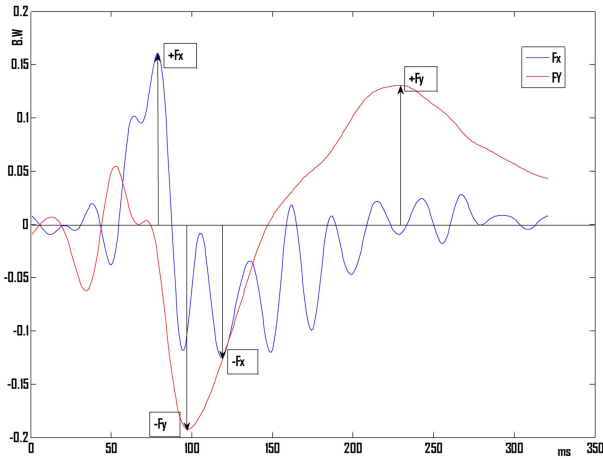


Figure 3. Mediolateral and anteroposterior component of ground reaction force

를 제거한 후 Fast Fourier Transform (FFT)을 이용 시간 영역 데이터를 주파수 영역 데이터로 전환 분석했다. 각 주파수 성분의 파워(p)는 주파수 크기(a)의 제곱으로 계산되었다. 그러나 이지 이후의 시간 영역에 부과된 0은 계산될 파워를 감소시키기 때문에 0처리되지 않은 순수한 파워를 얻기 위해서는 다음과 같은 공식을 이용했다(Shorten & Winslow, 1992).

$$p_i = (a_i)^2(stance + swing)swing^{-1}$$

여기서

stance=지지국면으로 0처리되지 않은 실제 분석 구간

swing=스윙국면으로 0처리된 구간

이산(discrete) power spectrum은 샘플링 율과 샘플링 시간에 의해 결정되는 주파수 성분 사이의 간격에 좌우되기 때문에 비교를 위해 PSD를 계산해야 한다. 이를 위해 다음과 같은 공식을 사용했다.

$$psd_i = p_i \Delta f^{-1}$$

여기서 psd_i = i번째 주파수 성분의 PSD

Δf = 주파수 bin

연구의 목적을 위해 주파수 성분의 100 Hz 범위 내에서 고려되었다(Ryu, 2005).

이와 같은 절차에 의해 정리된 신호로부터 시간 함수 분석은 수직 지면반력의 수동 성분에 대해 최대 충격 피크 크기(passive peak), 최대 충격 피크 발생 시간(passive peak time), 충격 부하율(load rate) 등을 산출했다. 충격 부하율은 최대 수동피크 크기를 피크 발생 시간으로 나누어 계산했다(Figure2).

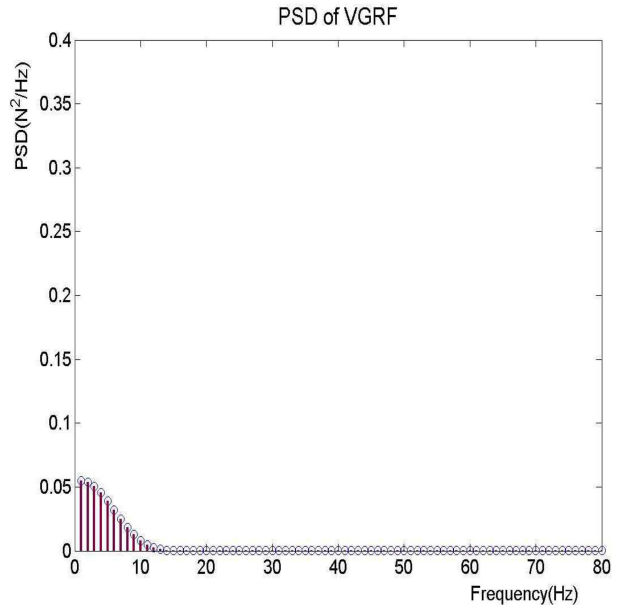


Figure 4. Frequency analysis of VGRF.

지면반력의 수직의 능동 성분(Figure 2)과 전후 및 좌우 지면반력의 착지와 이지 순간에 대해서는 최대 피크 크기와 피크 발생 시간만을 분석했다(Figure 3). 주파수 함수에 대한 분석은 수직 지면반력의 능동과 수동 성분(Figure 4), 전후 및 좌우 지면반력 신호에 대해 실시했으며, 비교를 위해 최대 주파수를 활용했다.

4. 자료 분석

오래 달리기 경과 시간에 따른 지면반력 신호 수집은 각 대상자별 최소한 10번의 스트라이드 중에서 주동 발 지면반력 성분을 선정해 프로팅(plotting)한 후 이들 중 5, 6 스트라이드 신호에서 평균에 가까운 신호를 분석했다. 산출된 변인에 대해 시간 조건 간의 차이를 분석하기 위해 반복측정 일원 변량분석(repeated measure one way ANOVA)을 실시했으며, 유의한 결과가 있을 경우, 사후 검정으로 Tukey 다중 비교를 5분 결과 값에 기준해 검사를 적용했다. 이때, 통계적 유의수준은 모든 비교에서 $\alpha=.05$ 로 설정했다.

III. 결 과

앞서 기술한 방법에 의해 분석된 오래 달리기 시간 경과에 대한 지면반력의 수직 성분에 대한 선정된 변인들의 값은 <Table 2>에 나타났으며, 좌우 성분과 전후 성분에 대한 값들은 각각 <Table 3>과 <Table 4>와 같다.

이들 표들에 의하면 수직 지면반력 신호의 최대 능동 값

Table 2. Vertical GRF components by lapse of running time

Fz time (m)	Active peak (BW)	Active peak time (ms)	Passive peak (BW)	Passive peak time (ms)	Impact load rate (BW/s)	Active component Freq (Hz)	Passive component Freq (Hz)
5	2.32±0.22	128±17	0.60±0.16	44±10	14.9±6.7	3±2	42±8
35	2.34±0.21	119±19	0.68±0.20	41±24	20.2±10.2	4±3	39±8
65	2.34±0.23	117±14	0.67±0.14	40±19	18.5±5.9	4±3	37±7
95	2.32±0.22	120±16	0.65±0.15	38±21	20.5±8.6	5±5	37±7
125	2.20±0.26*	127±31	0.64±0.20	42±25	18.0±6.4	4±4	38±10
155	2.25±0.21*	119±16	0.66±0.14	43±26	19.5±8.9	5±4	38±10
F ratios	5.21*	1.44	1.25	0.56	2.20	1.56	1.64

*means $p < .05$

Table 3. Mediolateral GRF components by lapse of running time

Fx time (m)	Contact Fx peak (BW)	Contact Fx peak time (ms)	Toe-off Fx peak (BW)	Toe-off Fx peak time (ms)	Fx-freq (Hz)
5	0.11±0.08	64±22	0.13±0.04	99±35	76±41
35	0.13±0.07	64±32	0.15±0.06	101±67	63±30
65	0.14±0.08	55±12	0.17±0.07	102±37	74±31
95	0.14±0.10	51±13	0.16±0.09	101±33	69±32
125	0.12±0.10	54±14	0.15±0.09	105±33	68±32
155	0.17±0.16	52±13	0.16±0.09	99±25	66±32
F ratios	1.54	1.83	0.73	0.08	0.71

Table 4. Anteroposterior GRF components by lapse of running time

Fy time (m)	Contact Fy peak (BW)	Contact Fy peak time (ms)	Toe-off Fy peak (BW)	Toe-off Fy peak time (ms)	Fy-freq (Hz)
5	0.20±0.05	86±11	0.19±0.03	227±25	31±8
35	0.19±0.04	76±16	0.20±0.04	217±21	32±11
65	0.20±0.06	76±15	0.20±0.04	219±18	32±11
95	0.20±0.07	71±15*	0.20±0.05	215±22	31±9
125	0.18±0.07	71±21*	0.20±0.05	217±21	33±11
155	0.19±0.07	72±16*	0.20±0.04	219±22	32±13
F ratios	0.73	4.20*	0.15	0.0	0.47

은 달리기 시간 경과에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보였는데 ($p < .05$), 달리기 초기 5분에 비해 95분 달리기까지는 대략 체중의 2.32에서 2.34로 별다른 차이를 보이지 않지만, 125분 이후 감소하는 뚜렷한 현상을 보였다 ($p < .05$). 그렇지만 이 최대 피크가 발생하는 평균 시간은 오래 달리기 시간 경과에 따라 불규칙한 양상을 보여 통계적인 차이는 확인할 수 없었다. 한편 최대 수동력 피크는 오래 달리기 시작 평균 체중의 0.60배로 가장 적은 값을 보이며, 이후 전체적으로 증가를 보였으나 달리기 경과 시간에 따른 선형적인 증가 양상은 나타나지 않았다. 이 최대 수동력 피크가 발생하는 시간은 40 ms 전후로 발생되었지만

시간 경과에 따른 차이는 통계적으로 유의한 차가 일어나지 않았다. 최대 충격력 피크와 이 피크가 발생한 시간으로 나눈 충격 부하율은 평균적으로 달리기 시작 5분에 가장 적은 값을 보이고 이후 증가했으나, 역시 시간 경과에 따른 유의한 차이는 나타나지 않았다. 주파수 함수에 대한 지면반력의 수직 성분 중에 능동 부분은 최대주파수가 3-5 Hz 범위에 있었으며, 수동 성분은 40 Hz 전후의 최대주파수를 포함하고 있었으나, 이들 크기들은 시간 경과에 따른 통계적 유의차는 보이지 않았다.

오래달리기 시간 경과에 따른 지면반력 좌우 성분(Fx)의 경우 발이 지면에 접촉하는 순간 신체중심 방향으로 작용

하는 힘은 시작 순간인 5분에서 체중의 0.11배를 보이다가 시간 경과에 따라 증가 양상을 보였으나, 통계적 유의차는 확인되지 않았다. 이 힘이 발생하는 시간 또한 달리기 전 반기보다 후반기에 감소 현상을 보였으나, 대상자 간의 큰 편차로 인해 유의한 특징은 확인되지 않았다. 달리기 시 발이 지면에 접촉 후 신체중심 오른쪽으로 향하는 힘은 중심으로 향하는 힘과 크기에서 비슷했으나 이 역시 뚜렷한 통계적 유의차가 확인되지 않았다. 이 힘이 발생한 힘은 시간 경과에 따라 비슷한 값을 보여 역시 통계적 유의차가 없었다. 달리기 시 좌우 지면반력 신호의 최대 주파수는 수직 지면반력의 수동 성분의 2배에 육박하는 특징을 보였으나,

이 또한 시간 경과에 따른 유의한 차이는 보이지 않았다.

오래달리기 시 지면반력의 전후 성분(Fy) 중에 발이 지면에 접촉하는 제동 순간 신체 후 방향으로 작용하는 최대 반력은 달리기 시작 5분 후 평균 체중의 0.2배 정도를 보였으며, 시간 경과에 따라 소폭의 증감이 있었으나 유의한 차이는 나타나지 않았다. 반면 이 최대 힘이 발생하는 시간은 달리기 초기인 5분에서 평균 86 ms를 보이다가 시간 경과에 따라 점점 감소하는 통계적으로 유의한 현상을 보였다($p < .05$). 95분 이후는 달리기 초기 5분에 비해 유의한 감소 현상이 나타났다($p < .05$). 반면에 달리기 시 발이 지면을 밀고 나가는 추진 순간 신체 앞 방향으로 작용하는 최대 반력의 크기는 제동 순간의 최대 힘과 거의 비슷했으며, 달리기 시간에 따른 뚜렷한 차이를 보이지 않는 특징도 유사했다. 또한 이 최대 추진력의 발생 시간은 통계적으로 유의한 차이를 확인 할 수 없었다. 달리기 시 지면반력의 전후 성분에 대한 주파수 분석 결과 앞서 기술한 수직 반력과 수평 반력과 마찬가지로 달리기 시간 경과에 따른 차이는 보이지 않았다. 전후 지면반력 신호의 최대주파수는 평균적으로 수직 지면반력 수동 성분보다는 약간 적은 값을 보였다.

IV. 논 의

본 연구는 시간 경과에 따른 오래 달리기 시 신체 피로가 지면반력 성분 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 관찰해 잠재적 상해 가능성을 예측하고자 했다. 본 연구 결과 지면반력의 수직 신호 중에 최대 능동력(active force)의 크기는 달리기로 인한 피로에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 피로한 근육의 신전력 감소와 피로로 인한 이동의 변화 혹은 자기 수용 감각 변화, 신체 자체 엔돌핀의 방출로 인한 고통 감각 변화 등 여러 가지 요인들에 의해 피로에 따라 하지근 수축이 원활하게 이루어지지 않은 결과라 판단되며(Dickinson, Cook, & Leinhardt, 1985), 대상자들은 지면에 하지를 추진하는 조절 능력이 떨

어진 것으로 생각된다(Jean-Benoit et al., 2011). 또한, 최대 능동력의 크기는 초기 달리기 순간에 비해 2시간 30분 달린 후 평균 약 3.1% 정도 감소했다. 이것은 오래 달리기에서 수직 지면반력의 능동 성분이 달리기 초기보다 24시간 후 평균 4.4% 감소했다고 보고한 Jean-Benoit 등(2011)의 연구 결과와 달리기 시간 차이로 직접 감소폭을 비교하는데 무리가 있지만 오래 달리기로 인한 피로는 수직 지면반력의 최대 능동력 약화에 영향을 미쳤다는 결과와 일맥상통했다. 또한 마라톤 달리기에서 수직 지면반력의 능동 성분이 감소했다고 관찰한 Nicol 등(1991)의 연구와도 일치했다. 한편 선행연구 등에서 상해 유발과 관련이 깊다고 보고된 수동력의 크기와 이를 시간에 의해 나눈 부하율은 본 연구에서 달리기 초기에 비해 2시간 30분 후 소폭 증가했지만 통계적으로 유의한 차이가 확인되지 않았다. 이와 같은 결과는 24시간 달리기 후 충격 부하율이 5.96% 증가했지만 통계적으로 유의한 차가 없었던 Jean-Benoit 등(2011)의 연구 결과와 매우 비슷한 특징을 보였다. 그렇지만 몇몇 연구들에서 힐 스트라이크 크기는 피로와 관련해 유의하게 증가한다고 보고했다. Dickinson 등(1985)은 피로 전 힐 스트라이크 크기는 평균 체중의 186%, 15, 30, 45분에서 평균 203%까지 증가했다고 보고하고 있다. Gerlach 등(2005)은 정기적으로 달리기를 하는 여성 주자들이 피로에 따라 그들의 달리기 스타일에 적응하는 것으로 나타났으며, 그 결과 충격 피크와 부하율은 달리기 후 각각 평균 6, 11% 감소했고, 능동력의 크기는 변화가 없었다고 보고해 본 연구 결과와는 상반된 주장이었다. 또한 Finni, Kyrlinen, Avela & Komi(2003)는 10 km 장거리 달리기에서 수직 지면반력의 수동피크 값은 감소를 보였지만, 능동력 크기는 변화가 없다고 본 연구와 다른 결과를 제시했다. 달리기 시 지면반력의 성분 크기의 변화는 달리기 속도, 스텝 길이, 하지 관절 운동학의 변화에 기인한 것으로 알려지고 있다(Gerlach et al., 2005). 향후 피로 상태에서 달리기 시 능동력을 변화시키는 요인을 찾아 이들 요인들의 변화는 충격력을 최소화하고, 상해를 예방하기 위한 최적의 운동 수행 능력을 유도하는지에 대한 관계 규명의 연구가 필요하리라 본다.

본 연구 결과 시간 경과에 따른 분석된 좌우 지면반력의 성분은 유의한 차이를 보이지 않았다. 특히 Stefanyshyn, Stergiou, Lun 등(2001)은 달리기 시 전두면과 횡단면 무릎 관절 모멘트 증가는 주자들의 상해를 유도하는 가장 가능성이 큰 요인이라 지적해, 이들 모멘트에 간접적으로 영향을 미치는 좌우 방향에서 일어나는 충격을 관심 있게 살펴보았으며, Stefanyshyn Stergiou, Meeuwisse 등(2006)은 무릎 외전 충격은 주자들의 슬개 대퇴골의 통증 유발의 한 요인이라고 주장해 역시 지면반력의 수평 성분에 잠재적 상해 유발 가능성을 두었다.

또한 전후 지면반력은 착지 순간이나 이지 순간 반력의 크기는 달리기 시간 증가에 따라 별다른 차이를 보이지 않았다. 본 연구는 Finni 등 (2003)의 10 km 달리기 후 착지 순간 전후 지면반력 크기는 유의한 감소를 보였다는 결과와는 다르지만 이지 순간은 변함없다는 결과와는 일치한다. 다만 전후 지면반력 성분 값 중에 착지 순간 최대 피크 크기를 발생하는 시간이 달리기 시간이 증가됨에 따라 감소하는 현상이 뚜렷했다. 이와 같은 현상은 주어진 속도에 지속적으로 적응하기 위한 신체의 움직임과 관련되므로(Derrick, Dereu, & McLean, 2002) 왜 이런 현상이 일어나는지 원인을 규명하기 위해서는 향후 신체 운동학, 특히 하지와 관련해 관찰할 필요성이 요구된다.

달리기의 효과는 잘 알려져 있지만, 19-79%의 주자들은 매년 상해를 입는다(Bredeweg & Buist, 2011). 달리기와 관련된 상해 위험 요소들은 학자들 간에 의견이 분분하다. 특히 최근에 충격력과 상해와 관계는 분분하다. Hreljac 등 (2000)은 이전에 적어도 한번은 과다 사용 상해를 가진 주자들은 상해를 입지 않는 주자들보다 충격율과 크기가 컸다고 보고한 반면, Duffey, Martin, Cannon, Craven, & Messier (2000)은 비 상해자와 전방 무릎 고통을 가진 대상자 간의 비교에서 비 상해자가 충격 피크와 부하율이 컸다는 다른 결과를 보고했다. 그렇지만 상대적으로 많은 연구자들이 수동력 피크와 부하율에 무게를 두고 있다(Hreljac et al., 2000; Milner et al., 2006; Pohl et al., 2009). 이런 견해에 방점을 두고 본 연구 결과를 해석해 볼 때 오래달리기로 인한 피로는 상해의 잠재력을 유발하는데 그리 크지 않은 것으로 판단된다.

지면반력의 수직 성분 주파수 내용은 상해 메카니즘에 더 많은 통찰력을 제공한다. 달리기 시 뼈와 연골의 변형과 같은 수동적인 메카니즘은 고주파 신호의 흡수 때문이며, 신전성 근 수축과 운동학적 조정과 같은 능동적 메카니즘은 저주파 흡수를 위한 작용 때문인 것으로 알려져 있다(Agruber, Davis, & Hamill, 2011). 본 연구 결과 수직 지면반력 성분의 수동과 능동 두 부분 모두 주파수 분석에서는 달리기 시간 증가에 따라 크게 유의한 차이는 보이지 않는 것으로 보아 오래 달리기 피로는 뼈 관련 상해와 근의 과다 수축으로 인한 건염과 같은 상해 유발에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 시간 함수 분석에서 능동 성분은 달리기 피로에 따라 감소를 보였지만, 주파수 분석에서 이들 능동 성분의 변화는 없는 것으로 나타났다 이는 능동 성분의 주파수가 저주파로 구성되었기 때문에 달리기 시간에 따라 주파수 변화의 폭이 크지 않은 것으로 생각된다. 지면 반력 세 성분 중 좌우 성분 중에 가장 큰 고주파수가 발생한 것은 달리기 시 신체가 좌우로 속도의 변화가 민감하게 이루어진다는 것을 방증하는 것으로 해석할 수 있으며, 이와 같은 결과는 보행 운

동과 같은 양상을 보였다(Ryu, 2006). 그러나 본 연구에서 이들 좌우 성분의 주파수뿐만 아니라 전후 성분의 주파수 변화는 달리기로 인한 피로에 따라 유의한 차이는 보이지 않았다.

V. 결 론

본 연구는 트레이드 밀 달리기 시간 증가에 따른 피로가 지면반력 신호 성분에 미치는 영향을 관찰하고자 하지에 상해 경험에 없는 후속 착지 유형 20-30대 남성 20명을 선정해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

달리기 시간 증가에 따른 수직 지면반력 성분은 수동력의 크기, 부하율, 능동 및 수동 성분의 주파수 등은 유의한 통계적 차이는 보이지 않았지만, 능동력의 크기는 2시간 이후 감소하는 경향이 유의하게 나타났다($p < .05$). 좌우 지면반력 성분은 착지 순간과 이지 순간 최대 피크 크기와 주파수는 달리기 시간 증가에 따라 유의하게 증감되지 않았다. 전후 지면반력 성분의 경우 착지 및 이지 순간 최대 피크 크기와 주파수는 달리기 시간 증가에 따라 변화가 일어나지 않았지만, 착지 순간 최대 피크 발생 시간은 달리기 시간 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다($p < .05$).

이들 결론으로부터 오래달리기로 인한 피로는 잠재적 상해를 유발하는데 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

향후 이와 관련된 연구를 수행하기 위해서는 하지의 운동학과 지면반력과의 관계를 분석할 필요성이 요구되며, 달리기 시간 조건을 보다 길게 설정해 관찰할 필요성 또한 제안하고자 한다.

참고문헌

- Agruber, A. H., Davis, I. S., & Hamill, J. (2011). Frequency content of the vertical ground reaction force component during rearfoot and forefoot running patterns. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43, S720.
- Bredeweg, S., & Buist, I. (2011). No relationship between running related injuries and kinetic variables. *British Journal of Sports Medicine*, 45, 310-384.
- Brggemann, G. P., & Arndt, A. (1994). Fatigue and lower extremity function. *Proceedings of 8th Biennial Conference of the Canadian Society of Biomechanics*, 316-317.
- Brggemann, 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.
- Cavanagh, P. R., & LaFortune, M. A. (1980). Ground reaction forces in distance running. *Journal of Biomechanics*, 13, 397-406.
- Collins, J., & Whittle, M. W. (1989). Impulsive forces during walking and their clinical implications. *Clinical Biomechanics* 4(3), 179-187.
- Derrick, T. R., Dereu, D., & McLean, S. (2002). Impacts and kine-

- matic adjustments during an exhaustive run. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(6), 998-1002.
- Dickinson, J. A., Cook, S. D., & Leinhardt, T. M. (1985). The measurement of shock waves following heel strike while running. *Journal of Biomechanics*, 18(6), 415-422.
- 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.
- Duffey, M. J., Martin, D. F., Cannon, D. W., Craven, T., & Messier, S. P. (2000). Etiologic factors associated with anterior knee pain in distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(11), 1825-1832.
- Elliot, B., & Ackland, T. (1981). Biomechanical effects of fatigue on 10,000 meter running technique. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 52(2), 160-166.
- Finni, T., Kyrlinen, H., Avela, J., & Komi, P. V. (2003) Maximal but not submaximal performance is reduced by constant-speed 10-km run. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 43(4), 411-417.
- Frederick E., & Hagy J. (1986). Factors affecting peak vertical ground reaction forces in running. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2(1), 41-49.
- 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 and Exercise*, 37(4), 657-663.
- 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.
- Hamill, J., Freedson, P. S., Boda, W. L., & Reichsman, F. (1988). Effects of shoe type and cardiorespiratory responses and rearfoot motion during treadmill running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20(5), 515-521.
- Hamill, J., & McNiven, S. (1990). Reliability of selected ground reaction force parameters during walking. *Human Movement Science*, 9(2), 117-131.
- Hatze, H. (1997). A three-dimensional multivariate model of passive human joint torques and articular boundaries. *Journal of Clinical Biomechanics*, 12(2), 128-135.
- Hreljac, A., Marshall, R. N., & Hume, P. A. (2000). Evaluation of lower extremity overuse injury potential in runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(9), 1635-1641.
- 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.
- Jean-Benoît, 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., Kim, D., Seo, J., Yi, Y., & Park, S. (2008). Muscle fatigue compensating exoskeleton. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 5, 191-192
- Miller, B. J., Pate, R. R., & Burgess, W. (1988). Foot impact force and intravascular hemolysis during distance running. *International Journal of Sports Medicine*, 9(1), 56-60.
- Milner, C. E., Ferber, R. C., Pollard, C. D., Hamill, J., & Davis, I. S. (2006). Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners. *Medicine and Science in Sport and Exercise*, 38(2), 323-328.
- 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*, 1(1), 10-17.
- Nicholas, S., Giannis, G., Jennifer, E. B., & Valerie, P. (2002). Frequency domain characteristics of ground reaction forces during walking of young and elderly females. *Clinical Biomechanics*, 17, 615-617.
- Nigg, B. M., Bahlens, H. A., Luethi, S. M., & Stokes, S. (1987). The influence of running velocity and midsole hardness on external impact forces in heel-toe running. *Journal of Biomechanics*, 20(10), 951-959.
- Nigg, B. M., & Bobbert, M. (1990). On the potential of various approaches in load analysis to reduce the frequency of sports injuries. *Journal of biomechanics*, 23(1), 3-12.
- 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., Hamill, J., & Davis, I. S. (2009). Biomechanical and anatomical factors associated with a history of plantar fasciitis in female runners. *Clinical Journal of Sports Medicine*, 19(5), 372-376.
- Ryu, J. S. (2005). Gender differences in the impact magnitude and its attenuation during running. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 15(1), 091-109.
- Ryu, J. S. (2006). Comparisons of frequency domain characteristics of ground reaction forces during walking of young and elderly males. *The Korean Journal of Physical Education*, 4(5), 457-464.
- Ryu, J. S. (2010). Effects of quiet standing and walking with high-heeled shoe on the balance. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 20(4), 479-486.
- Shorthen M. R., Winslow D. S. (1992) Spectral analysis of impact shock during running. *International Journal of Sport Biomechanics*, 8(4), 288-304.
- 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(1), 12-28.
- Stefanyshyn, D. T., Stergiou, P., Lun, V. M. Y., & Meeuwisse, W. H. (2001). Dynamic variables and injuries in running. *2001 ISB Footwear Symposium*, 74.
- Stefanyshyn, D. T., Stergiou, P., Meeuwisse, W. H., Worobets, J. T., & Lun, V. M. Y. (2006). Knee angular impulse as a predictor of patellofemoral pain in runners. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(11), 1844-1851.
- Stefanyshyn, D. T., Stergiou, P., Nigg, B. M., Lun, V. M. Y., & Meeuwisse, W. H. (2000). The relationship between impact forces and running injuries. *XXVth Congress of the Societe de Biomecanique and the XIth Congress of the Canadian Society for Biomechanics*, 43.
- 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(8), 615-617.
- Verbitsky, O., Mizrahi, J., Voloshin, A., Treiqer, J., & Isakov, E. (1998). Shock transmission and fatigue in human running. *Journal of Applied Biomechanics*, 14(3), 300.
- Voloshin, A. S., & Wosk, J. (1982). An in-vivo study of low back pain and shock absorption in the human locomotor system. *Journal of Biomechanics*, 15(1), 21-27.
- Whittle, M. W. (1999). Generation and attenuation of transient impulsive forces beneath the foot: a review. *Gait and Posture*, 10(3), 264-275.
- Williams, K. R., Snow, R., & Agruss, C. (1991). Changes in distance running kinematics with fatigue. *International Journal of Sports Biomechanics*, 7(2), 138-162.
- Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (1994). Physiology of sport and exercise. *Human kinetics*, 110-522.