트레드밀 운동부하에 의한 피로가 수직 점프력과 지면반력 변인에 미치는 영향*

류재청 · 현승현 · 김영표**

제주대학교

ABSTRACT

Che-Cheong Ryew · Seung-Hyun Hyun · Young-Pyo Kim. Effects of Vertical Jump Performance and Ground Reaction Force Variables according to the Fatigue by Submaximal Treadmill Exercise. *KINESIOLOGY*, 2016, 18(3): 1-11. **[PURPOSE]** The purpose of this study was to investigate the effects. of the vertical jump and ground reaction force variables according to fatigue by submaximal treadmill exercise. **[METHODS]** We selected n=9 young and healthy men(mean age: 25.33±3.80 yrs, mean heights: 1.73±0.02 m, mean body weights: 69.65±6.79 kg). Fatigue was induced by a short period of strenuous exercise performed on a treadmill with using the Bruce protocol. The variables analyzed were the vertical jump height, ground reaction force(medial lateral[ML] GRF, anterior posterior[AP] GRF), peak vertical force[PVF], and dynamic postural stability index([MLSI, APSI, VSI, DPSI]) according to induced fatigue. **[RESULTS]** 1. Vertical jump heights was significantly lower posttest($p<.01$). 2. AP GRF, PVF, and loading rate were significantly lower posttest($p<.05$). 3. Dynamic postural stability index([MLSI[left], VSI, DPSI]) was significantly higher posttest($p<.05$). 4. GRF variables showed similar correlation(PVF with loading rate $r=.596[R^2=35\%]$, MLSI with APSI $r=.816[R^2=66\%]$, VSI with DPSI $r=.970[R^2=94\%]$) according to induced fatigue($p<.05$). **[CONCLUSIONS]** In conclusion, fatigue alters vertical jump performance and landing performance including changes in dynamic stability; and GRF magnitudes. Also future research should continue to investigate the different GRF responses that occur during landing after fatigue.

Key words : fatigue, vertical jump, drop landing, ground reaction force, dynamic postural stability index

주요어 : 피로, 수직점프, 드롭랜딩, 지면반력, 동적자세안정성지수

서론

스포츠 활동은 신체중심의 수평이동과 함께 수직 점프 및 착지 동작이 자주 발생되며(Cavanagh & Laforune, 1980; Kellis & Kouvelioti, 2009), 운동상황에 따라 한발 착지 또는 양발 착지가 이루어진다(Dufek & Bates, 1991; Yeow et al., 2010).

이중 수직 점프력은 배구, 축구, 농구, 배드민턴 등의 스포츠에서도 운동성능에 매우 중요한 요소이며, 하지의 근력과 신체 각 부위별 상호작용 및 협응에 의해 결정되는 기술이다(Rodacki et al., 2002). 특히, 폭발적인 근수축을 요구하기 때문에 하지근의 순발력과 가장 높은 상관성이 있으며(Markovic et al., 2004), 순발력을 측정하기 위한 도구로도 사용되고 있다

(Aragon-Vargas & Gross, 1997).

반면, 착지 동작은 지면에 발 접촉을 시작으로 무릎, 엉덩이, 척주로 부하가 전이되지만, 신체는 주로 하지관절을 통해 부하의 전이를 최소화 및 흡수시킨다(Dufek & Bates, 1991). 이때, 작용-반작용에 의한 지면반력을 보다 효과적으로 흡수하여 자세 안정성이 확보되어야 하지만, 한발 착지 시 발생하는 충격력은 무려 체중의 11배 까지 도달할 수 있다(McNitt-Gray, 1991). 이 물리적인 충격유형은 근골격계에 의해 감쇠되어야 하는데(Kellis & Kouvelioti, 2009), 지면 접촉 시 지면반력에 대한 강도조절의 실패와 안정성 및 균형성이 저하되면 부상이 발생될 수 있다(Boden et al., 2000; Wikstrom et al., 2004).

이와 같은 이유로 착지 과정에서 가장 흔하게 발생

* 이 논문은 2016학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

** 교신저자: kimyp@jeju.ac.kr

되는 부상 부위는 하지의 무릎과 발목으로 보고하고 있으며, Johnson et al.(1998)은 운동 상해의 약 40% 정도가 발목에서 발생되고, 대부분이 피로를 느끼는 스포츠 활동의 종료시점에서 빈번하게 발생하는 것으로 보고하였다(Simoneau et al., 2005). Gray et al.(1985)의 연구에서도 76명의 여자 농구선수들을 대상으로 부상부위를 조사한 결과, 72%는 무릎부상이었으며, 이중 십자인대파열(anterior cruciate ligament rupture)은 25%로 보고했다. 또 Gerberich(1987)의 연구에서도 배구경기에 참여한 106명의 선수들 중 90%가 하지에서 발생되었고, 무릎부상이 23%, 발목부상은 59%를 차지한다고 보고하고 있다.

스포츠 활동 중 나타나는 피로는 반복적인 근 수축 시 힘을 발휘하지 못하거나 동일한 수축신호에 반응하지 않는 것을 의미하며(Asmussen, 1979; Gibson & Edwards, 1985), 특히, 하지 부위의 부상발생과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 이 외에도 운동 시 유발된 피로는 자세 안정성에 요구되는 근육과 고유 수용기의 역학적 특징을 손상시키고(Gribble & Hertel, 2004; Bilodeau et al., 2001; Hiemstra et al., 2001), 자세제어와 운동 협응에 영향이 미쳐 부상 발생율이 더 증가되는 것으로 알려져 있다(Bizid et al., 2009; Price et al., 2004).

피로발생과 부상 간 밀접한 관계가 있는 만큼, 실험 연구를 통해 피로유발과 몇몇 변인들 간의 관계를 규명한 연구들이 이루어졌다. 이중, 피로유발 방법은 대부분 기능적 움직임을 이용한 피로유발 방법과 등속성 동력계를 이용한 피로유발 방법으로 대별된다. 후자의 등속성 동력계를 이용한 방법은 피로 수준을 표준화하기 쉽고, 특정 근육군의 피로를 발생시킬 수 있는 장점이 있으나 스포츠 상황에서 발생하는 특정 피로를 유발하기 어려운 단점이 있다(Hosseinimehr et al., 2010). 전자의 기능적 움직임을 이용한 피로유발 방법은 조깅, 전력질주, 점프, 팔굽혀펴기 등과 같이 스포츠와 직접적으로 관련된 기능적 움직임을 적용할 수 있다는 이점을 갖고 있는데(Hosseinimehr et al., 2010), 피로를 유발 시킨 후 역학적 변인들 간의 관계를 분석한 연구(Ryu, 2013; Lee et al., 2000; Martin et al., 2010), 착지 동작을 분석한 연구들이 관찰된다(Moran & Marshall, 2006; Riemann et al., 2002). 피

로유발 방법들은 운동조건과 연구의 목적에 따라 트레드밀(treadmill) 위에서 24시간 달리기(Martin et al., 2010), 160분 동안 선호속도 달리기(Ryu, 2013), 20분 달리기(Riemann et al., 2002), 점증적 운동부하 프로토콜(Moran & Marshall, 2006; Lee et al., 2000) 등의 기능적 움직임을 이용한 피로유발 방법들을 사용하였다.

하지만, 일상생활에서 쉽게 참여할 수 있는 축구, 배구, 농구, 배드민턴 등은 단 시간에 높은 강도의 근력을 사용해 달리기와 점프-그리고 착지 동작이 이루어지기 때문에 피로 유발(Hootman et al., 2007; Cavanagh & Lafortune, 1980) 및 부상 발생률이 높다(Ferretti et al., 1992; Ford et al., 2003; Lee & Lim, 2014; Wong & Hong, 2005).

이렇듯, 선행연구들은 피로를 유발하여 운동학적 변인과 운동역학적 변인 간의 관계를 통해 상해와의 연관성을 규명하기 위한 노력들이 이루어져 왔으나, 앞서 설명한 바와 같이 피로 유발 방법은 특정 부위의 근피로 또는 장시간 오래 달리기를 실시한 연구들이 대부분이다. 또 단시간 달리기로 인한 피로유발 후 착지동작을 분석하여 충격력 및 자세안정성의 변화 관련 연구는 부족하다. 즉, 피로유발이 근골격계에 부상뿐만 아니라 스포츠 활동에서 양의 시간적 또는 물리적 손실을 가져올 수 있기 때문에(Kellis & Kouvelioti, 2009), 단시간 달리기를 통한 점증적 운동부하 방식을 적용하여 수직 점프력의 변화 및 착지 시 지면반력 성분들의 변화를 파악하고 각 변인들 간의 관계를 면밀히 조사할 필요성이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 트레드밀 운동부하에 의한 피로가 수직점프력 및 지면반력에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. 특히, 피로유발 전·후에 따른 지면반력 매개변인 값들을 표준화(%)하여 각 분석 변인 간의 상관성을 파악하고 자료를 축적하고자 하였다.

연구방법

연구대상

본 연구의 대상자는 성인 남성 9명(연령: 25.33±3.80

ys, 신장: 1.73 ± 0.02 m, 체중: 69.65 ± 6.79 kg)으로 선정하였으며, 20분 이상 지속적인 달리기와 점핑-착지를 수행하는데 무리가 없는 자들이었다. 실험을 실시하기 전, 본 연구의 목적과 내용 그리고 실험순서에 대해 충분히 설명하였고, 이러한 내용에 대해 이해하고 자발적으로 동의한 자에 한하여 실시하였다.

실험설계 및 절차

본 연구에서 실험을 실시하기 전, 사전에 선정된 대상자들에게 24시간 전부터 가벼운 강도 이상의 운동을 주의시켰으며, 3시간 전 식사를 금지시켰다. 실험에 응할 수 있도록 충분한 준비운동(warm-up)을 공통적으로 실시하였고, 이때, 반팔과 반바지를 착용시켰다.

전반적인 실험 설계는 <Figure 1>과 같고, 우선 사전검사에서 수직점프 및 드롭랜딩을 실시하여 지면반력 변인들을 살펴보았다. 드롭랜딩은 일정한 수직높이(40 cm)로 제작된 나무박스 위에서 지면반력기(AMTI-OR-7, USA)로 위로 착지를 유도한 후 샘플링율은 1,000 Hz로 자료들을 수집하였고, 수직점프는 상·하지 분절의 움직임을 이용해 최대로 수행할 것을 요구하였다. 이때, 지면반력기에서 발이 벗어나거나, 착지 시 자세제어의 실패, 신체중심의 전방이동, 그리고 사전 충격으로 인한 자료전송 등의 오류를 제외시켜 성공한 동작을 선별한 후 PC에 저장하였다.

Pretest	Treadmill & Fatigue	Posttest
Vertical jump Drop landing	Bruce protocol(1973)	Vertical jump Drop landing

Figure 1. Experimental design

이후, 대상자들의 피로를 유발시키기 위해 트레드밀위에서 점증적 운동부하테스트를 all-out 까지 실시하였으며, 이때 신체가 건강한 자들에게 적용될 수 있는 Bruce 프로토콜(Bruce et al., 1973) 적용(Lee et al., 2000; Kim et al., 2009; Trabulo et al., 1994) 및 호흡가스대사 분석장치는 MetaLyzer3B system으로 세팅하였다. Bruce 프로토콜은 트레드밀에서 1.7 mph 속도로 10% 경사에서 운동을 한 후, 매 3분마다 경사를 2% 증가 및 각 속도는 2.5, 3.4, 4.2, 5.0, 5.5 mph로

Figure 2. Treadmill running

점증적으로 증가되는 방식이다. 이때 트레드밀 운영에 많은 경험이 있는 전문가가 대상자들에게 사전 안정을 취하도록 요청하였고, 준비된 자에 한하여 트레드밀에 올라서는 방법과 Borg(1982)의 운동자각도(rating of perceived exertion[RPE]) 판단방법, 탈진 시 중지요령 등 유의사항들을 설명하였다. 연구자는 달리기를 실시하는 동안 대상자의 호흡곤란, 안면홍조, 불규칙적인 움직임 등을 지속적으로 관찰하였고, 트레드밀 후면 바닥에 매트설치 및 연구 보조자가 위치하여 대상자들의 낙상에 대처하려 하였다.

피로가 유발된 대상자는 종료직후 2 m 거리 내에 배치된 위치에서 사전측정과 동일하게 수직점프와 드롭랜딩을 실시하였다. 특히, 사후검사가 중요한 만큼 반복적인 측정으로 인한 휴식시간 및 피로회복 등을 고려해 1분 안에 완료하였다(Harkins et al., 2005).

이와 같이, 모든 대상자들은 사전검사-피로유발-사후검사 순으로 진행하여 종료된 후 충분한 휴식을 취하게 유도하였다.

자료처리

본 연구에서 사전·사후검사를 통해 수집된 지면반력 자료들은 Kwon GRF 2.0 program(Visol, Korea), Excel 2007(Microsoft, USA)을 이용하여 분석하였다.

수직 점프력은 지면반력에서 수집된 체공시간(t_{flight})을 투사체 운동방정식에 적용해 무게중심의 수직높이(h)를 다음과 같이 산출하였다(Bosco et al., 1983).

$$h = \frac{1}{8} g (t_{flight})^2$$

드롭랜딩 시 수집된 최대수직지면반력은 체중으로 나누어 표준화(normalization)하였다. 3방향(좌-우[medial-lateral], 전-후[anterior-posterior], 수직[vertical] 지면반력)의 힘 성분을 이용해 정밀도를 구하는 동적자세안정성지수(dynamic postural stability index[DPSI])는 (Wikstrom et al., 2005) 최대 값(max) 발생시점을 기준으로 평가하였다(Hyun & Ryew, 2014).

$$MLSI = \sqrt{\sum (0 - F_{xmax})^2 / samples}$$

$$APSI = \sqrt{\sum (0 - F_{ymax})^2 / samples}$$

$$VSI = \sqrt{\sum (0 - F_{zmax})^2 / samples}$$

$$DPSI = MLSI + APSI + VSI$$

이때 단위 시간당 각 방향별 힘 성분들이 증가하게 되면 자세유지를 위한 신체움직임의 변동이 더 증가되는 것이다(Wikstrom et al., 2005). 이 관점에서 지수의 값이 높아지면 안정성이 저하되는 것이며, 지수의 값이 감소하면 안정성은 향상되는 것을 의미한다.

부하율(부하율)은 단위 시간당 신체에 가해지는 힘으로 계산하였다(Munro et al., 1987). 이때 발이 지면에 접지되는 시점부터 수직지면 반발력이 50N을 넘어 인체에 신호가 적용된 시점의 값을 최대수직 지면반력(PVF) 값에서 제외시킨 후 소요시간(Δt)으로 나누었다.

$$Loadingrate = \frac{Fzmax - F50^+}{\Delta t}$$

분석된 자료들은 PASW 18.0 통계프로그램을 이용하여 평균과 표준편차를 산출하였다. 측정 전·후에 따라 paired *t*-test를 실시하였고, 표준화(%)한 매개변인들 간 상관성은 피어슨의 적률상관계수(Pearson Correlation Coefficients)를 이용하여 분석하였다. 이때 모든 통계적 유의수준은 $\alpha=.05$ 로 설정하였다.

결과

대상자들에게 트레드밀위에서 점증적 운동부하를 all-out까지 실시한 결과, 평균 체중당 최대산소섭취량(VO_2max/kg)은 $51.55 \pm 16.49 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 평균 환기량

Table 1. Results of V'E and VO_2max/kg

Variables	V'E ($\ell \cdot \text{min}^{-1}$)	VO_2max/kg ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Subject 1	101.3	46
Subject 2	166	92
Subject 3	114.6	51
Subject 4	87.1	48
Subject 5	71.2	47
Subject 6	134.6	59
Subject 7	90.6	43
Subject 8	77.3	43
Subject 9	100.3	35
M $\pm$ SD	104.77 $\pm$ 29.92	51.55 $\pm$ 16.49

(V'E)은 $104.77 \pm 29.92 \ell \cdot \text{min}^{-1}$ 로 확인되었다(Table 1).

피로유발 후 수직 점프력과 지면반력 성분의 변화는 <Table 2>와 같다. <Figure 3>과 같이 수직 점프력의 변화는 사전검사 보다 사후검사에서 수직 높이가 더 감소되어 통계적 유의한 차이를 나타냈다($p<.01$).

<Figure 4>와 같이 좌-우 지면반력(M-L force)의 변화는 피로유발에 따라 좌-우 다리 모두 통계적 유의한 차이는 없었고($p>.05$), 전-후 지면반력(A-P force)의 변화는 사전검사보다 사후검사에서 좌-우 다리 모두 더 높게 통계적 유의한 차이를 보였다($p<.01$). 최대 수직 지면반력(PVF)과 부하율의 변화는 사전검사 보다 사후검사에서 좌-우 다리 모두 더 증가되어 통계적 유의한 차이를 나타냈다($p<.001$).

드롭랜딩 시 동적자세안정성지수는 각 대상자들의 지수 값을 이용하여 방사형 그래프로 나타내었다. 이때, 그래프의 중심을 기준으로 면적이 상대적으로 증가되면 안정성이 감소되는 것을 의미하고 면적이 감소될수록 안정성은 향상됨을 의미한다(Figure 5, 6).

Figure 3. Vertical jump according to the fatigue

Table 2. Results of GRF parameter and dynamic postural stability index

Variables	Land leg	Pretest	Posttest	$\Delta\%$	t	p
Vertical jump(m)	-	0.57±0.04	0.50±0.06	-12.28	4.289	.003**
Medial lateral GRF(N/BW)	Left	-.11±0.24	-.25±0.28	127.27	1.383	.204
	Right	0.28±0.15	0.23±0.21	-17.86	.811	.441
Anterior posterior GRF(N/BW)	Left	0.20±0.44	0.62±0.29	210.00	3.778	.005**
	Right	0.09±0.29	0.44±0.28	388.89	2.813	.023*
Peak vertical force(N/BW)	Left	6.38±0.85	8.01±1.22	25.55	4.015	.004**
	Right	6.37±0.79	7.60±1.10	19.31	3.464	.009**
부하율(N/BW·sec ⁻¹)	Left	144.42±47.94	252.68±58.54	74.96	5.032	.001***
	Right	156.21±41.55	233.27±43.29	49.33	6.532	.000***
MLSI	Left	1.60±0.88	2.26±0.85	41.25	3.247	.012*
	Right	1.67±0.75	2.07±0.66	23.95	2.229	.056
APSI	Left	5.65±1.57	6.57±2.06	16.28	1.275	.238
	Right	6.09±0.75	6.48±1.59	6.40	.779	.458
VSI	Left	34.14±2.64	45.07±10.18	32.02	3.281	.011*
	Right	34.77±3.44	42.67±7.73	22.72	3.786	.005*
DPSI	Left	41.39±4.44	53.91±12.51	30.25	3.285	.011*
	Right	42.55±4.22	51.23±8.51	20.40	3.851	.005*

NOTE: *** $p<.001$, ** $p<.01$, * $p<.05$

그 결과, 좌-우 안정성지수(MLSI)는 사전검사와 비교해 사후검사에서 좌측 다리의 지수가 더 높게 통계적 유의한 차이가 나타났고($p<.05$), 전-후 안정성지수(APSI)는 피로유발에 따라 통계적 유의한 차이는 없

었다($p>.05$). 수직 안정성지수(VSI)와 전체안정성지수(DPSI)의 변화는 사전검사 보다 사후검사에서 지수 값이 더 높게 통계적 유의한 차이를 나타냈다($p<.001$). 산출된 변인 간 상관성은 수직 점프력, 그리고 양

Figure 4. GRF variables according to the fatigue

Figure 5. Dynamic postural stability index on the left leg during drop landing

Figure 6. Dynamic postural stability index on the right leg during drop landing

측 간 평균값의 사전-사후 변화량(%)을 사용하여 분석하였다(Table 3). 또 각 변인 간 상관관계를 시각적으로 확인하기 위해 산점도 및 회귀식을 그림으로 나타내었다(Figure 7). 유의수준 $p < .05$ 이상의 변인들을 분석한 결과, PVF와 부하율 간 $r = .596 (R^2 = 0.35, p < .05)$

으로 정적상관을 나타냈다. 동적자세안정성지수 간 APSI와 MLSI 간 $r = .816 (R^2 = 0.666, p < .05)$, VSI와 DPSI 간 $r = .970 (R^2 = 0.940, p < .001)$ 로 높은 설명력 및 정적상관을 나타냈다.

Table 3. Correlationship relative

Section	M-L force	A-P force	PVF	부하율	MLSI	APSI	VSI	DPSI
Vertical jump	-.272	.478	-.268	.015	.268	.305	.059	.118
M-L GRF		-.289	.226	.252	.362	.114	-.137	-.087
A-P GRF			-.060	-.042	-.302	-.276	-.018	-.090
PVF				.596*	-.149	.160	.438	.416
부하율					-.402	-.175	.497	.377
MLSI						.816*	-.189	.047
APSI							.339	.556
VSI								.970**

NOTE: ** $p < .001$, * $p < .05$

Figure 7. Scatter plot and coefficient determination

논의

근육의 피로는 일반적으로 격렬한 신체활동 시 발생되며(James et al., 2010), 반응시간 지연(Zhou et al., 1998), 자세제어(Miura et al., 2004; Rodacki et al., 2002), 그리고 작업능력 및 최대수의근력(Asmussen, 1979; Gandevia, 2001)에 변화를 가져온다. 이에 본 연구는 트레드밀 위에서 점증적 운동부하를 실시하여 피로유발이 수직 점프력과 지면반력 변인에 미치는 영향을 분석하기 위해 실시하였다.

수직 점프 시 이지(toe-off) 속도에 대한 신체 각 분절의 기여도는 무릎신전 56%, 발목의 저축굴곡 22%, 체간신전 10%, 팔스윙 10%, 그리고 머리분절은 2%로 하지가 주 역할을 한다(Luhtanen & Komi, 1978). 이에 Rodacki et al.(2002)이 등속성 동력계를 이용해 하지부위에 두 유형으로 특정 피로를 유발한 결과, 수직 점프력은 무릎의 굴근(flexor muscle) 피로유발에서 큰 차이는 없는 반면, 신근(extensor muscles) 피로유발은 점프력이 더 감소된다고 하였다. 또 Park et al.(2015)의 연구에서도 등속성 동력계를 이용해 좌-우측 무릎 신전근의 피로유발 방법을 60°/sec, 가동범위 90°로 실시한 결과, 사전 수직점프 높이 44.8 cm에서 50% 피로유발 후 40.8% 감소, 30%에서는 38%로 감소(pre>50>30)된다고 보고하고 있다. 본 연구에서도, 수직 점프력의 변화는 피로유발에 따라 사전 0.57 m에서 사후 0.50 m로 -12.28% 더 감소되어 통계적으로 유의하였으며, 선행연구들과 일부 유사한 결과를 보였다. 이 관점에서 달리기로 인한 피로유발이 수직 점프력의 감소에 영향을 주는 것으로 밝혀졌으며, 스포츠 활동은 달리기 동작이 많은 비중을 차지하는 만큼(Cavanagh & Lafortune, 1980; Kellis & Kouvelioti, 2009), 개인 목적달성을 위해 필요한 운동성능은 더 저하될 수 있다고 판단된다.

착지 시 피로유발에 따라 좌-우 지면반력(ML GRF)에 큰 차이는 없었으나, 전-후 지면반력(AP GRF), 최대수직지면반력(PVF), 그리고 부하율(부하율)은 좌-우 다리 모두 통계적으로 유의한 증가를 보였다. ML, AP GRF는 지면과 평행하게 적용되는 전단력을 말하며, 이중 AP GRF는 신체의 진행방향에 대해 제동력이 가해

질 때, (-)값이 생성되지만, 진행방향에 대한 추진과정에서는 (+)값이 생성된다. 이러한 결과는 달리기 동작이 엉덩, 무릎 관절의 굴/신, 발목 관절의 저축/배축 굴곡이 주 움직임으로 작용하는 만큼, AP 방향의 GRF에 변화가 발생된 것으로 생각된다(Winter et al., 1996). 반면, ML GRF가 개인의 특성에 따라 패턴이 다양하고 가변성이 큰 만큼(Cavanagh & Lafortune, 1980), AP GRF 역시 랜딩 동안 개인특성에 따라 생성 패턴에 차이가 있는 것으로 판단되며, 추후 후속연구에서 자세안정성 지수(MLSI, APSI) 외에도 전단력 관련 다양한 변인들을 파악할 필요가 있다고 사료된다.

부하율의 변화는 Coventry et al.(2006)이 피로유발 후 34.5 cm 높이에서 한발 착지를 실시한 결과, 168.6 N/BW·sec⁻¹에서 193.5 N/BW·sec⁻¹로 더 증가되었고, Madigan & Pidcoe(2003)의 연구에서도 피로 전 178.6 N/BW·sec⁻¹과 피로 후 186.7 N/BW·sec⁻¹로 증가된다는 연구와 유사한 결과를 보였다. 하지만, 본 연구의 결과가 피로유발 후 더 큰 부하율이 나타나, 이는 실험환경인 드롭랜딩의 수직높이 차에서 기인된 것으로 판단된다(Eun et al., 2012). 특히, 충격력의 발생시간은 충격을 받는 동안 발생하는 감각 신호에 대한 근육의 반응 시간보다 짧고 생리적 제어 시간 역시 짧다고 보고하고 있는데(Nigg & Liu, 1999; Kawato, 1999), 본 연구에서 피로유발 후 단위 시간당 신체가 받아들이는 부하율과 PVF 간 $r=.596(R^2=35\%)$ 로 서로 증가되는 정상관 관계를 나타내고 있어, 피로유발과 한발 착지 동작은 지면으로부터 생성되는 큰 지면반력을 보다 효과적으로 제어하지 못해, 충격쇼크 발생(Lafortune et al., 1996) 및 하지부위 부상의 발생률은 더 증가될 수 있다고 사료된다(Boden et al., 2000; Wikstrom et al., 2004).

본 연구에서 사용된 동적안정성지수의 계산은 착지 후 지면반력 종로시점을 명확하게 정의할 수 없기 때문에 PVF 생성 시점까지의 힘 성분들을 일정한 샘플 수로 나누었다. PVF 발생지점까지의 평균소요시간은 피로유발 전 좌-우 다리별 각각 0.049 sec와 0.042 sec에서 피로유발 후 0.032 sec와 0.032 sec로 더 감소되는 결과를 보였다. 좌-우 다리 간 피로유발 전 MLSI에서 피로유발에 따라 큰 차이가 없는 우측 다리와는 다르게 좌측 다리의 지수 값이 더 증가하였고, VSI와 DPSI는 좌-우 다리의 지수 값들이 더 높게 통계적으

로 유의하였다. 또 상관분석에서 MLSI와 APSI 간 $r=.816(R^2=.66\%)$, VSI와 DPSI 간 $r=.970(R^2=.97\%)$ 로 서로 증가되는 정상관 관계와 높은 설명력을 보였다. 이러한 결과는 DPSI가 MLSI, APSI, VSI의 합으로 계산되는데, 이중 VSI가 자세안정성에 가장 큰 영향을 주는 것으로 사료된다. 즉, 피로유발 후 자세 안정성이 감소된 결과는 충격 유형의 증가와도 관련이 있지만, 자세유지를 위한 충분한 시간 확보의 실패와도 관련이 있다(Brazen et al., 2010; Zhou et al., 1998). 따라서 착지 시 피로유발에 의한 자세반응시간의 감소가 자세안정성을 더 저하시킬 수 있다고 사료된다.

한편, 좌-우 다리 착지 간 차이가 있는 MLSI의 서로 다른 결과는, 우세-비우세 다리 간 다양한 점핑-착지 동작(Maulder & Cronin, 2005)과 스포츠 활동에서 나타나는 기능차이(Barfield, 1995; Carpes et al., 2007; Dörge et al., 2002; Nunome et al., 2006)에 기인된 것으로 생각된다. 따라서 스포츠 활동 시 목적 달성의 이유로 점핑 이후 착지 다리(좌, 우)의 선정이 어려울 수 있기 때문에, 추후 피로유발에 따른 양측 다리 간 비대칭성과 성능차이 관련 연구가 더 필요하다고 생각된다.

이와 같이, 점증적 부하방식을 이용한 피로유발은 하지 근육의 힘 생산을 감소시키고, 피로 수준의 증가와 수직 점프력 감소 간 비례적인 관련이 있음을 시사한다(Smilios, 1998). 따라서 스포츠 활동 시 심각한 수준의 피로를 피하는 것이 운동성능과 충격력 제어 및 자세안정성 확보에 더 효과적일 수 있다고 생각되며, 부상예방에도 도움이 될 수 있다고 사료된다.

결론

트레드밀 위에서 Bruce 프로토콜을 이용해 점증적 운동부하를 실시하여 피로를 유발시켰다. 수직 점프력, 그리고 드롭랜딩 시 자세 안정성은 감소되는 반면, 충격유형은 반비례적으로 증가되는 관계를 보였다. 따라서 스포츠 활동 시 부상을 예방하기 위해서는 운동의 종목과 함께 개인의 체력수준이 고려되어야 하겠다. 또 양측 체지 간 균형 있는 움직임이 중요한 만큼, 피로유발에 따른 양측 체지 간의 성능비교뿐만

아니라 미끄러짐과 관련이 있는 요구마찰계수 및 다양한 변인들을 고려하여 부상이 예방될 수 있는 후속 연구들이 이루어지길 제언한다.

참고문헌

- Aragon-Vargas, L. E., & Gross, M. M. (1997). Kinesiological factors in vertical jump performance: Differences among individuals. *Journal of applied Biomechanics*, 13, 24-44.
- Asmussen, E. (1979). Muscle fatigue. *Medicine and Science in Sports*, 11(4): 313-321.
- Barfield, W. R. (1995). Effects of selected kinematic and kinetic variables on instep kicking with dominant and nondominant limbs. *Journal of Human Movement Studies*, 29(6): 251.
- Bilodeau, M., Henderson, T. K., Nolte, B. E., Pursley, P. J., & Sandfort, G. L. (2001). Effect of aging on fatigue characteristics of elbow flexor muscles during sustained submaximal contraction. *Journal of Applied Physiology*, 91(6): 2654-2664.
- Bizid, R., Margnes, E., François, Y., Jully, J. L., Gonzalez, G., Dupui, P., & Paillard, T. (2009). Effects of knee and ankle muscle fatigue on postural control in the unipedal stance. *European Journal of Applied Physiology*, 106(3): 375-380.
- Boden, B. P., Dean, G. S., Feagin, J. A., & Garrett, W. E. (2000). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics*, 23(6): 573-578.
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(5): 377-381.
- Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational*

- Physiology*, 50(2): 273-282.
- Brazen, D. M., Todd, M. K., Ambegaonkar, J. P., Wunderlich, R., & Peterson, C. (2010). The effect of fatigue on landing biomechanics in single-leg drop landings. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 20(4): 286-292.
- Bruce, R., Kusumi, F., & Hosmer, D. (1973). Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *American Heart Journal*, 85(4): 546-562.
- Carpes, F. P., Rossato, M., Faria, I. E., & Mota, C. B. (2007). Bilateral pedaling asymmetry during a simulated 40-km cycling time-trial. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 47(1): 51-57.
- Cavanagh, P. R., & LaFortune, M. A. (1980). Ground reaction forces in distance running. *Journal of Biomechanics*, 13(5): 397-406.
- Coventry, E., O'Connor, K. M., Hart, B. A., Earl, J. E., & Ebersole, K. T. (2006). The effect of lower extremity fatigue on shock attenuation during single-leg landing. *Clinical Biomechanics*, 21(10): 1090-1097.
- Dörge, H. C., Andersen, T. B., Sørensen, H., & Simonsen, E. B. (2002). Biomechanical differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. *Journal of Sports Sciences*, 20(4): 293-299.
- Dufek, J. S., & Bates, B. T. (1991). Biomechanical factors associated with injury during landing in jump sports. *Sports Medicine*, 12(5): 326-337.
- Eun, S. D., Yang, J. H., Kim, Y. W., Kang, M. S., & Kwak C. S. (2012). The effect of visual & cognitive information of landing height on landing strategy during drop landing. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 22(4): 405-411.
- Ferretti, A., Papandrea, P., Conteduca, F., & Mariani, P. P. (1992). Knee ligament injuries in volleyball players. *The American Journal of Sports Medicine*, 20(2): 203-207.
- Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2003). Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(10): 1745-1750.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4): 1725-1789.
- Gerberich, S. G. (1987). Analysis of severe injuries associated with volleyball activities. *Physician and Sportsmedicine*, 15(8): 75-79.
- Gibson, H., & Edwards, R. H. T. (1985). Muscular exercise and fatigue. *Sports Medicine*, 2(2): 120-132.
- Gray, J., Taunton, J. E., McKenzie, D. C., Clement, D. B., McConkey, J. P., & Davidson, R. G. (1985). A survey of injuries to the anterior cruciate ligament of the knee in female basketball players. *International Journal of Sports Medicine*, 6(6): 314-316.
- Gribble, P. A., & Hertel, J. (2004). Effect of lower-extremity muscle fatigue on postural control. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(4): 589-592.
- Harkins, K. M., Mattacola, C. G., Uhl, T. L., & Malone, T. R. (2005). Effects of 2 ankle fatigue models on the duration of postural stability dysfunction. *Journal of Athletic Training*, 40(3): 191-194.
- Hiemstra, L. A., Lo, I. K., & Fowler, P. J. (2001). Effect of fatigue on knee proprioception: implications for dynamic stabilization. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 31(10): 598-605.
- Hootman, J. M., Dick, R., & Agel, J. (2007). Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives. *Journal of Athletic Training*, 42(2): 311.
- Hosseini-mehr, S. H., Hassan, D., & Asghar, N. A. (2010). The effects of activity related fatigue on static and dynamic postural control in college athletes. *Journal of Biomechanics*, 4(2): 148-155.

- Hyun, S. H., & Ryew, C. C. (2014). Investigation of the ground reaction force parameters according to the shoe's heel heights and landing distance during downward stairs on bus. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 24(2): 151-160.
- James, C. R., Scheuermann, B. W., & Smith, M. P. (2010). Effects of two neuromuscular fatigue protocols on landing performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20(4): 667-675.
- Johnston R. B., Howard, M. E., Cawley, P. W., & Losse, G. M. (1998). Effect of lower extremity muscular fatigue on motor control performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(12): 1703-1707.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current opinion in Neurobiology*, 9(6): 718-727.
- Kellis, E., & Kouvelioti, V. (2009). Agonist versus antagonist muscle fatigue effects on thigh muscle activity and vertical ground reaction during drop landing. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(1): 55-64.
- Kim, H. D., Lee, K. K., & Lee, J. S. (2009). Differential effects of fatigue induced by short strenuous exercise on recovery and change of postural stability. *Journal of Sport and Leisure Studies*, 38: 907-916.
- Lafortune, M. A., Hennig, E. M., & Lake, M. J. (1996). Dominant role of interface over knee angle for cushioning impact loading and regulating initial leg stiffness. *Journal of Biomechanics*, 29(12): 1523-1529.
- Lee, J. H., & Lim, B. O. (2014). Sports for all injury mechanism and prevention program review. *The Korean Journal of Physical Education*, 53(4): 533-542.
- Lee, M. S., Yi C. H., Cho, S. H., & Kwon, O. Y. (2000). The effects of fatigue induced by submaximal treadmill exercise on body sway. *Korean Research Society of Physical Therapy*, 7(2): 35-54.
- Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1978). Segmental contribution to forces in vertical jump. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 38(3): 181-188.
- Madigan, M. L., & Pidcoe, P. E. (2003). Changes in landing biomechanics during a fatiguing landing activity. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(5): 491-498.
- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18(3): 551-555.
- Martin, V., Kerhervé, H., Messonnier, L. A., Banfi, J. C., Geyssant, A., Bonnefoy, R., Féasson, L., & Millet, G. Y. (2010). Central and peripheral contributions to neuromuscular fatigue induced by a 24-h treadmill run. *Journal of Applied Physiology*, 108(5): 1224-1233.
- Maulder, P., & Cronin, J. (2005). Horizontal and vertical jump assessment: reliability, symmetry, discriminative and predictive ability. *Physical Therapy in Sport*, 6(2): 74-82.
- McNitt-Gray, J. L. (1991). Kinematics and impulse characteristics of drop landing from three heights. *International Journal of Sport Biomechanics*, 7(2): 201-224.
- Miura, K., Ishibashi, Y., Tsuda, E., Okamura, Y., Otsuka, H., & Toh, S. (2004). The effect of local and general fatigue on knee proprioception. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 20(4): 414-418.
- Moran, K. A., & Marshall, B. M. (2006). Effect of fatigue on tibial impact accelerations and knee kinematics in drop jumps. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(10): 1836-1842.
- 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. M., & Liu, W. (1999). The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact

- force peaks during running. *Journal of Biomechanics*, 32(8): 849-856.
- Nunome, H., Ikegami, Y., Kozakai, R., Aprianono, T., & Sano, S. (2006). Segmental dynamics of soccer instep kicking with the preferred and non-preferred leg. *Journal of Sports Sciences*, 24(5): 529-541.
- Park, K. H., Youm, C. H., & Kim, Y. J. (2015). Effects of extensor fatigue levels of both knee joints and genders on vertical jump height and joint motions lower extremities. *The Korean Journal of Physical Education*, 54(5): 815-828.
- Price, R. J., Hawkins, R. D., Hulse, M. A., & Hodson, A. (2004). The football association medical research programme: an audit of injuries in academy youth football. *British Journal of Sports Medicine*, 38(4): 466-471.
- Riemann, B. L., Schmitz, R. J., Gale, M., & McCaw, S. T. (2002). Effect of ankle taping and bracing on vertical ground reaction forces during drop landings before and after treadmill jogging. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 32(12): 628-635.
- Rodacki, A. L., Fowler, N. E., & Bennett, S. J. (2002). Vertical jump coordination: fatigue effects. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(1): 105-116.
- Ryu, J. S. (2013). Effect of a prolonged-run-induced fatigue on the ground reaction force components. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 23(3): 225-233.
- Simoneau, E., Martin, A., & Van Hoecke, J. (2005). Muscular performances at the ankle joint in young and elderly men. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 60(4): 439-447.
- Smilios, I. (1998). Effects of varying levels of muscular fatigue on vertical jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 12(3): 204-208.
- Trabulo, M., Mendes, M., Mesquita, A., & Seabra-Gomes, R. (1994). Does the modified bruce protocol induce physiological stress equal to that of the bruce protocol ? *An Official Journal of the Portuguese Society of Cardiology*, 13(10): 753-60.
- Wikstrom, E. A., Powers, M. E., & Tillman, M. D. (2004). Dynamic stabilization time after isokinetic and functional fatigue. *Journal of Athletic Training*, 39(3): 247.
- Wikstrom, E. A., Tillman, M. D., Smith, A. N., & Borsa, P. A. (2005). A new force-plate technology measure of dynamic postural stability: the dynamic postural stability index. *Journal of Athletic Training*, 40(4): 305.
- Winter, D. A., Prince, F., Frank, J. S., Powell, C., & Zabjek, K. F. (1996). Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, 75(6): 2334-2343.
- Wong, P., & Hong, Y. (2005). Soccer injury in the lower extremities. *British Journal of Sports Medicine*, 39(8): 473-482.
- Yeow, C. H., Lee, P. V. S., & Goh, J. C. H. (2010). Sagittal knee joint kinematics and energetics in response to different landing heights and techniques. *The Knee*, 17(2): 127-131.
- Zhou, S., Carey, M. F., Snow, R. J., Lawson, D. L., & Morrison, W. E. (1998). Effects of muscle fatigue and temperature on electromechanical delay. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 38(2): 67.