

태권도 선수들의 피로가 수직 점프력, 자세 안정성 및 지면반력 성분에 미치는 영향

The Effects of the Ground Reaction Force Components, Postural Stability, and Vertical Jump Performance according to the Fatigue in Taekwondo Athletes

Seung-Hyun Hyun, Young-Pyo Kim, Che-Cheong Ryew

Department of Kinesiology, College of Natural Science, Jeju National University, Jeju-Do, South Korea

Corresponding author

Che-Cheong Ryew

Department of Kinesiology, College of Natural Science, Jeju National University, 102 Jejudaehak-ro, Jeju, 63243, South Korea

Phone: +82-64-754-3588, Fax: +82-64-757-1752, Email: ryew@jejunu.ac.kr

Abstract

Objective: The purpose of this study was to investigate the effect of the ground reaction force components, postural stability, and vertical jump performance according to the fatigue in Taekwondo athletes.

Method: Ten Taekwondo athletes ([n=male: 5, female: 5]mean age: 22.30±2.62 yrs, mean height: 174.21±9.20 cm, mean body weights: 67.28±12.56 kg) participated in this study. Fatigue was induced by short period of strenuous exercise performed on motor driven treadmill. The variables analyzed consisted of vertical jump performance, static (ML[medial-lateral] COP[center of pressure], AP[anterior-posterior] COP, ΔCOP_x, ΔCOP_y, and COP area), postural stability index (MLSI, APSI, VSI, DPSI), and GRF components (M-L force, A-P force, PVF[peak vertical force], and loading rate). To analyze all the variables measured in this study, PASW Ver 22.0 statistics program was used to calculate the mean and standard deviation of all the factors, and paired *t*-test was used to evaluate according to fatigue between pretest and posttest. Also, Pearson's correlation coefficients among variables was analyzed. The statistical significance level was set as $\alpha=.05$.

Results: Vertical jump performance showed significant statistically with the more decrease of vertical heights at posttest than that of pretest. The AP COP, ΔCOP_x, COP area, APSI, VSI, and DPSI showed significant statistically with the higher increase at posttest than that of pretest in postural stability. The PVF, loading rate of GRF components in posttest showed significant statistically with the higher force than that of pretest. The postural stability variables (AP COP, ΔCOP_y, COP area, APSI, VSI, DPSI) showed similar correlation with GRF components (PVF, loading rate) according to the fatigue induces ($r=.600$, $R^2 = 37\%$).

Conclusion: These results suggest that the fatigue induces can be decreased the postural stability and exercise performance during game and training in Taekwondo athletes.

Keywords: Taekwondo, Fatigue, Postural stability, Vertical jump, Ground reaction force

INTRODUCTION

태권도 겨루기는 상대방에 의한 다양한 조건에서 안정적인 방어 및 신속한 공격이 이루어져야 한다. 공격 기술은 높은 난이도와 연속적인 움직임이 필요한데(Heller et al., 1998), 돌려차기, 옆차기, 앞차기, 그리고 반복적인 점핑 발차기 등을 수행하기 위해서는 우수한 하지 근력 및 파워를 보유하는 것이 필수적이다(Abidin & Adam, 2013; Roschel et al., 2009; Noorul, Pieter, & Erie, 2008; Dizon & Grimmer-Somers, 2012; Elsayy, 2010). 파워는 선수와 선수의 속도에 적용된 힘의 결과물이며(Reiser, Rocheford, & Armstrong, 2006; Rochel et al., 2009), 수직 점프력은 하지의 폭발적인 파워를 간접적으로 추정할 수 있고, 그 지표로 사용될 뿐만 아니라 운동역학적 기능과 밀접한 관련이 있다(Roschel et al., 2009; Noorul et al., 2008; Dizon & Grimmer-Somers, 2012; Markovic & Jaric, 2007).

반면, 방어기술은 선수가 보유하고 있는 좌우 다리의 성능에 의존해야 하며, 자세안정성의 확보도 중요하다(Kim, Kim, Shin, 2011). 하지만, 겨루기 중 발차기 공격의 기술빈도가 약 80%를 차지하기 때문에(Falcó, C., & Estevan, 2015) 균형유지가 힘들고 하지에 더 많은 힘과 에너지를 필요로 한다(Serina & Kieu, 1991). 따라서 태권도 선수들은 훈련과 경기도중 피로가 유발될 수 있는데, 피로로 인해 부상의 위험에 노출될 수 있으며(Hssin et al., 2015), 개인목적 달성에 실패하거나 부상이 발생할 수 있다(Wojciechowska-Maszkowska, Borysiuk, Wasik, Janisiów, & Nawarecki, 2012)

부상은 신체의 구조적·기능적 완전성을 유지하기 위해 신체의 능력을 초과하는 에너지 전달에 의한 신체적 부적응이다(Lystad, Pollard, & Graham, 2009; Ziaee, Rahmani, & Rostami, 2010). 태권도 선수들의 부상은 36%가 훈련도중 발생되며, 54%는 시합상황에서 발생된다고 보고하고 있다(Kazemi, Shearer, & Choung, 2005). 부상부위는 상지가 18%, 허리 10%, 머리 3.6%였지만, 하지부위가 46.5%로 가장 높았고(Kazemi et al., 2005), 이는 가라데, 합기도, 쿵푸, 태극권, 아이스하키, 그리고 농구보다 부상 발생률이 더 높다(Lystad et al., 2009; Zetaruk, Violan, Zurakowski, & Micheli, 2005; Pieter, 2005). 더 중요한 사실은 태권도 선수들의 부상발생 시점이 1라운드에서 7.5%, 2라운드는 43.1% 발생하였지만, 후반 부 마지막 3라운드에서 49.5%로 가장 높게 조사되었는데, 이렇듯 부상은 피로와 밀접한 관련이 있다(Hssin et al., 2015).

피로는 신경계의 많은 영역을 포함하고 있는 복잡한 현상으로(Boyas et al., 2011; Boyas & Guével, 2011), 근육이 수축 시 힘을 생산하지 못하거나 동일한 수축신호에 반응하지 않는 것을 말한다(Asmussen, 1979; Gibson & Edwards, 1985). 운동선수들에게 피로는 발목관절의 외측 염좌 발생을 일으키는 중요한 요인이며(Gutierrez, Jackson, Dorr, Margiotta, Kaminski, 2007), 균형성 향상을 위해 필요한 근육과 고유수용기의 역학적 특성 및 관련 능력들도 감소시킨다(Chabran, Maton, & Foument, 2002; Forestier, Teasdale, & Nougier, 2002; Harkins, Mattacola, Uhl, & Malone, 2005; Hiemstra, Lo, & Fowler, 2001). 이러한 결과는 운동 상황에서 협응과 자세제어에까지 영향을 미쳐 부상 발생률을 더 높인다고 보고하고 있다(Chabran et al., 2002; Price, Hawkins, Hulse, & Hodson, 2004).

이와 같이 태권도 선수들에게 발생하는 피로는 순발력, 자세제어, 그리고 역학적 변인에 영향을 줄 수 있으나, 선행연구들은 개인이 선호하는 워업 및 최적의 조건에서 양측 다리 간 360° 돌려차기 시 지면반력 조사(Lee & Huang, 2013), 스탠스 위치(0°, 45°, 90°)에 따른 발차기 능력(Estevan et al., 2013), 540° 뒤후려차기 동작의 운동역학적 분석(Kang, Kang, & Yu, 2013), 우세한 다리와 비우세한 다리 간 태권도 발차기(Kim & Kim, 2010) 등 특정 기술동작에 따른 지면반력 조사 연구가 대부분이다.

특히, Park, Jun, Park, Ryoo, & Choi(2002)의 연구에서 남녀 태권도 선수들은 경기 3회전 후 심박수, 혈중 젖산, 혈압, 심근산소 소비량이 유의하게 증가한다고 보고하였고, 장시간 태권도 수련이 최대산소섭취량, 무산소성역치 수준에도 영향을 주는 것으로 보고했는데(Kang, Shin, & Chung, 2009), 이는 태권도 경기시간이 3라운드 2분 경기와 중간 1분의 휴식 방식이지만, 동일점수 상황에서 4라운드까지 연장될 수 있기 때문이다. 또, 경기특성 상 상대방과의 신체접촉 및 타격지점에 대해 정확하고 빠른 발차기가 이루어져야 하지만, 근력운동으로 유발된 피로는 구심성 피드백의 방해와 관절의 고유수용성, 그리고 운동감각 특성을 손상시켜(Bizid et al., 2009; Harkins et al., 2005), 무리한 발차기와 착지동작이 발생할 수 있다. 이렇듯, 태권도 선수

들의 경기규칙과 비교해 볼 때, 전신에 적용될 수 있는 점증적 최대운동부하를 통해 피로를 유발할 필요성이 있으며, 이와 함께 수직 점프력의 변화 및 착지 시 자세안정성과 운동역학적 변인에 미치는 영향을 면밀히 파악할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 태권도 선수들에게 점증적 최대 운동부하 검사로 탈진을 유도하여 피로에 따른 수직 점프력, 자세 안정성과 지면반력 성분에 미치는 영향을 조사하기 위한 것이다. 또 각 변인들 간의 상관성을 비교하여 유사성 및 상반되는 특징들을 파악해 태권도 선수들과 관련자들에게 유용한 정보를 제공하고자 하였다.

MATERIALS AND METHODS

1. Subject

본 연구의 대상자들은 대학 및 실업팀 소속의 선수들(남: 5명, 여: 5명)로 10년 이상의 선수경력이 있는 자들이었다(Table 1). 이들은 수직 점프, 착지, 그리고 트레드밀 달리기 수행에 이상이 없었으며, 연구자는 본 연구의 목적과 내용을 충분히 설명하였고, 이에 대해 이해하고 자발적으로 동의한 자들에 한하여 실시하였다. 또 모든 참여자들에게 일상생활과 시합 상황에서 자주 사용하는 다리를 진술에 의존한 결과, 우측이 우세다리로 조사되었다.

Table 1. Characteristics of subjects (M±SD)

Section	Age (yrs)	Height (cm)	Body weights (kg)
Female (n=5)	21.80±1.92	169.90±4.92	58.38±3.68
Male (n=5)	22.80±3.34	180.52±3.34	76.18±11.98
M±SD	22.30±2.62	174.21±9.20	67.28±12.56

2. Experimental procedure

모든 대상자들에게 가벼운 소재의 반팔과 반바지를 착용시켰고, 개인별 준비운동을 충분히 실시하였다. 실험 순서는 사전검사에서 수직점프, 외발서기, 드롭랜딩을 실시하였고, 트레드밀 위에서 피로를 유발시킨 후 사후검사는 사전검사와 동일하게 적용하였다. 피로 효과를 유지하기 위해 드롭랜딩 실험위치는 트레드밀과 3 m 거리 내에 위치시켰고, 이와 같은 이유로 양발 수직 점프와 외발서기 역시 지면반력기 위해서 평가될 수 있는 방법을 적용하였다.

우선 지면반력기(AMTI-OR-7, USA) 위에서 대상자들은 시각 정보를 확보한 상태에서 외발서기를 약 20 sec 동안 실시하였고, 이중 무작위로 10 sec 간의 자료를 샘플링 윌 1,000 Hz로 수집하였다. 드롭랜딩 역시 피로 유·무에 따른 동일한 착지조건으로 평가하기 위해 일정한 높이(40 cm)에서 양손은 전상장골극(ASIS: anterior superior iliac spine)에 위치시킨 후 착지를 유도하였다.

피로유발은 트레드밀 위에서 Bruce protocol(Bruce, Kusumi, & Hosmer, 1973)을 적용하여(Kim et al., 2011; So, 2007; Lee & Yoo, 2009) 생리학 전공자에 의해 점증적 최대 운동부하 검사로 all-out 상태까지 실시하였으며, 피로가 유발된 직후 사후검사는 사전검사와 동일한 순서로 1분 이내에 완료하였다(Fagenbaum & Darling, 2003; Harkins et al., 2005; Kim & Youm, 2015). 특히, 피로가 유발된 직후 사후검사 순서 및 측정시간을 고려하여 우세다리(우측)의 외발 착지만을 실시하였다.

3. Analysis & process of data

실험순서 및 상황들을 고려해 수직점프는 지면반력기 위해서 실시되었다. 이에 체공시간(t_{flight})을 투사체 운동방정식에 적용하여 무게중심의 수직높이(h)를 산출하였다(Bosco et al., 1983).

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

자세안정성의 평가는 정적·동적안정성을 평가하였다. 정적 자세안정성은 압력의 중심(COP: center of pressure) 변인들인 A-P(anterior-posterior) COP, M-L(medial-lateral) COP(Michell, Ross, Blackburn, Hirth, & Guskiewicz, 2006), 그리고 COP 경로에 의해 생성된 최대·최소 변화량 및 COP 면적(area)을 적분하였다(Hyun & Ryew, 2014).

$$M - L COP_x = \frac{\sum_{t=0}^T COP_{x,t} - COP_{x,mean}}{T}$$

$$M - L COP_y = \frac{\sum_{t=0}^T COP_{y,t} - COP_{y,mean}}{T}$$

$$COP \text{ area} = \int_{t_1}^{t_2} \Delta COP_x \cdot \Delta COP_y$$

이때, COP 값이 증가될수록 좌·우(COP_x), 전·후(COP_y) 방향의 안정성이 저하되는 것을 의미함

Wikstrom, Tillman, Smith, & Borsa(2005)는 지면반력기 위에서 동적자세안정성을 평가할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 하지만, 착지 이후 종료시점을 명확하게 파악할 수 없기 때문에 시간함수가 증가되어 안정성지수의 값은 오류를 범할 수 있다. 따라서 드롭랜딩 시 오른쪽 발이 지면에 접지되는 순간부터 최대수직지면반력(1PVF: 1st peak vertical force)이 생성된 시점을 기준으로 정밀도를 평가하였다(Hyun & Ryew, 2014). 이때, 각 방향별 지수의 값이 증가하면 안정성은 저하되는 것을 의미하고, 지수의 값이 감소하면 안정성은 더 향상되는 것을 의미한다.

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

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

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

$$DPSI = MLSI + APSI + VSI$$

Kwon GRF 2.0 program(Visol, Korea), Excel 2007(Microsoft, USA)을 이용하여 지면반력 매개변인들을 분석하였고, 위 분석방법으로 산출된 데이터들은 PASW 22.0 program(IBM, USA)으로 기초통계량인 평균(M: mean) 및 표준편차(SD: standard)를 산출하였다. 태권도 선수들의 피로유발 전·후에 따라 paired *t*-test 를 실시하였고, 분석된 변인들 간 상관성을 분석하기 위해 피어슨의 적률상관계수(Pearson's Correlation Coefficients)를 이용하여 분석하였다. 이때, 모든 통계적 유의 수준은 $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

RESULTS

태권도 선수들에게 트레드밀 위에서 점증적 운동부하를 실시한 결과, 피로유발 강도는 체중당 최대산소섭취량(VO_{2max}/kg)이 $54.50 \pm 10.94 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 환기량(VE)은 $92.72 \pm 29.66 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 로 확인되었다(Heller et al., 1998; Toskovic, Blessing, & Williford, 2002, 2004; Jo & Kim, 2001; Kim, 1998).

1. 수직 점프력과 정적안정성의 변화

태권도 남·여 선수들의 피로유도에 따른 수직 점프력과 정적안정성을 분석한 결과는 (Figure 2)와 같다. 피로가 유발된 상태에서 수직 점프력의 변화는 피로유발 전과 비교해 통계적으로 유의하게 더 감소되었다 ($p < .001$). 오른쪽 발(우세다리)을 기준으로 외발서기를 실시하여 각 변인들을 분석한 결과, A-P COP, Δ COPy, COP area는 피로유발 전 보다 피로유발 상태에서 유의하게 더 증가된 형태를 보였고($p < .05$), M-L COP와 Δ COPx는 통계적 유의한 차이는 확인되지 않았다($p > .05$).

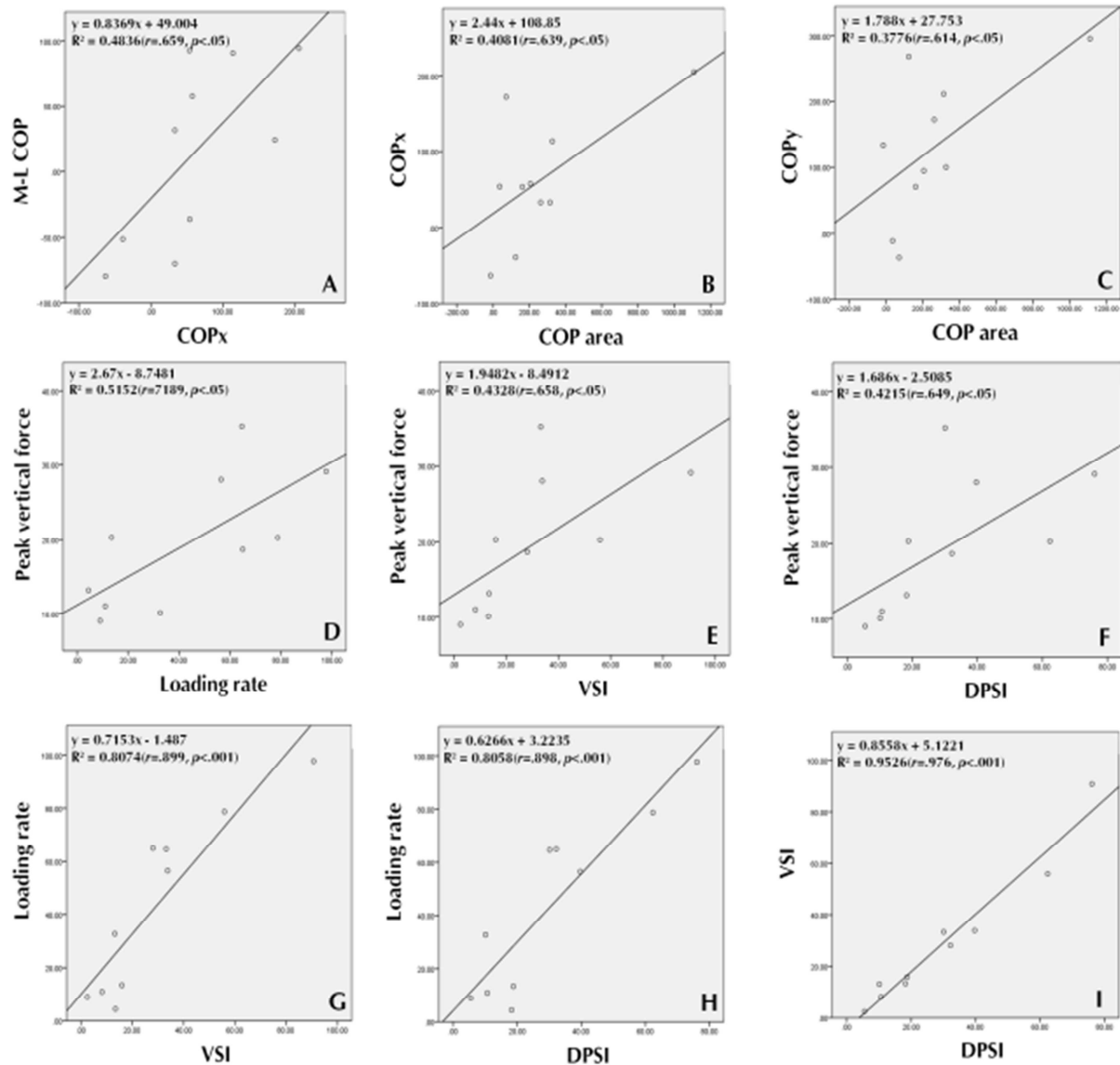


Figure 1. Scatter plot and coefficient of determination

2. 지면반력 성분과 동적자세안정성지수의 변화

(Table 3)과 같이 드롭랜딩을 실시하여 지면반력 성분과 동적자세안정성 지수를 살펴본 결과, M-L force, A-P force, MLSI는 측정 간 통계적 유의한 차이는 확인되지 않았지만($p > .05$), PVF, loading rate, APSI, VSI, 그

리고 DPSI는 피로유발 후 통계적으로 더 큰 값을 나타냈다($p < .01$).

Table 2. Vertical jump performance and static stability index

Section	Pre M±SD	Post M±SD	Δ %	t	p
Vertical Jump(m)	0.54±0.06	0.50±0.07	-7.40	4.511	.001***
Medial lateral COP	0.29±0.09	0.22±0.07	-24.13	.715	.492
Anterior posterior COP	0.21±0.11	0.40±0.20	90.47	2.490	.034*
ΔCOPx(cm)	2.39±1.75	2.97±0.83	24.26	.867	.408
ΔCOPy(cm)	2.37±0.85	4.84±1.91	104.21	3.607	.006**
COP area(cm ²)	5.81±4.72	14.09±6.45	142.51	3.558	.006**

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

Table 3. Ground reaction force parameter and dynamic postural stability index

Section	Pre M±SD	Post M±SD	Δ %	t	p
Medial lateral force(N/BW)	0.36±0.36	0.50±0.25	36.93	1.163	.275
Anterior posterior force(N/BW)	0.06±0.27	0.09±0.32	50.18	.223	.828
Peak vertical force(N/BW)	4.43±1.27	5.25±1.31	18.14	7.611	.000***
Loading rate(N/BW·sec ⁻¹)	89.86±32.11	122.93±33.72	36.80	4.434	.002**
MLSI	1.36±0.52	1.60±0.47	16.95	1.526	.161
APSI	3.39±0.70	4.79±1.31	41.61	3.678	.005**
VSI	24.37±5.63	30.67±4.96	25.85	4.411	.002**
DPSI	29.12±6.54	37.06±5.82	27.27	4.877	.001***

NOTE: *** $p < .001$

3. 각 변인들 간 상관성 조사

수직 점프력과 정적·동적 자세안정성지수, 그리고 지면반력 성분 간 상관성 분석결과는 (Table 4)와 같고, % 감소·증가의 유사성을 파악하기 위해 $r = .600$ 이상의 높은 상관계수들을 기술하였다.

M-L COP와 COPx 간 $r = .695$ ($R^2 = 0.483$, $p < .05$), COP area와 COPx 간 $r = .639$ ($R^2 = 0.408$, $p < .05$), COPy 간 $r = .614$ ($R^2 = 0.377$, $p < .05$)로 높은 상관을 보였다. 1 PVF와 loading rate 간 $r = .718$ ($R^2 = 0.515$, $p < .05$), VSI 간 $r = .658$ ($R^2 = 0.432$, $p < .05$), DPSI 간 $r = .649$ ($R^2 = 0.421$, $p < .05$) 높은 설명력 및 정적상관을 보였다. 또 loading rate와 VSI 간 $r = .899$ ($R^2 = 0.807$, $p < .001$), DPSI 간 $r = .898$ ($R^2 = 0.805$, $p < .001$), VSI와 DPSI 간 $r = .976$ ($R^2 = 0.952$, $p < .001$)로 높은 정적상관을 나타냈다.

Table 4. Correlationship relative to vertical jump performance and GRF components (unit: *r*)

Section	M-L LCOP	A-P PCOP	Δ COPx	Δ COPy	COParea	M-L force	A-P force	1 PVF	Loading rate	MLSI	APSI	VSI	DPSI
Vertical jump	.034	-.238	.191	.015	.207	.502	.459	-.020	-.266	.001	-.096	-.197	-.198
M-L COP		.240	.695*(A)	-.020	.539	.352	.443	-.539	-.226	.165	.099	-.455	-.386
A-P COP			-.142	.589	.362	-.163	-.102	-.239	-.090	-.239	-.419	-.242	-.326
Δ COPx				-.149	.639*(B)	.415	.056	-.491	-.111	-.276	.224	-.325	-.264
Δ COPy					.614*(C)	-.596	.041	-.093	-.253	-.030	-.592	-.284	-.429
COP area						.029	.165	-.440	-.254	-.356	-.484	-.437	-.524
M-L force							.308	-.103	.056	-.332	.389	-.036	.017
A-P force								.255	.043	.494	.026	-.057	-.022
1 PVF									.718*(D)	.125	.189	.658*(E)	.649*(F)
Loading rate										-.190	.435	.899****(G)	.898****(H)
MLSI											.063	-.112	-.017
APSI												.349	.532
VSI													.976****(I)

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

DISCUSSION

태권도 선수들은 경기를 하는 동안 혈중젖산농도(blood lactate concentration)와 심박수가 급격히 상승하는 데(Herror et al., 1998), 1, 2라운드에서 증가하기 시작하여 3라운드에서는 최대에 도달한다(Butios & Tasika, 2007). 이에 본 연구는 태권도 경기규칙인 2분 3라운드 1분 휴식의 상황에서 유발될 수 있는 전신의 피로 상황을 고려해, 트레드밀 위에서 점증적 운동부하를 실시한 후 수직 점프력과 자세 안정성 및 지면반력 성분변화들을 변화들을 살펴보았다.

우선, 수직 점프력을 분석한 결과, 사후검사에서 0.50±0.07 m로 사전검사의 0.54±0.06 m 보다 수직 높이가 더 감소되어 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. Park, Youm, & Kim(2015)이 20대 건강한 성인 남성 21명과 여성 21명을 피로수준 별 수직 점프력을 분석한 결과, 남성들은 사전 44.8 cm, 사후 50%는 40.8 cm, 사후 30%는 38 cm이며, 여성들은 각각 32.9 cm, 31.6 cm, 31.4 cm로 감소된다고 보고하였다. 본 연구의 대상자들은 남·여 실업팀 태권도 선수들로 구성하였는데, 일반인들의 수직 점프력과 비교해 상대적으로 더 높은 값을 보였으나, 피로유발에 따라 수직 점프높이가 더 감소되는 유사한 결과를 보였다. Gustin(2001)은 태권도 선수들의 호기성에너지 시스템의 변화와 신체에너지 시스템의 변화 간에 상호관련이 있으며 수직 점프력에도 영향을 준다고 보고하였다. 또 태권도 공격기술들은 발차기 점핑, 자세유지를 유지하기 위해 하지의 근력이 매우 중요하다(Fong & Ng, 2011). 따라서 피로유발은 남·여 태권도 선수들의 훈련 또는 겨루기 시 공격·방어 기술에 필요한 순발력, 점프력, 그리고 점프 발차기 등의 운동수행능력을 더 감소시킬 수 있다고 판단된다(Chiodo et al., 2011).

정적 안정성을 분석한 결과 M-L COP와 Δ COPx, 그리고 동적 안정성의 MLSI는 피로유발에 따라 큰 차이가 없었지만, A-P COP와 Δ COPy, COP area, APSI, VSI, 그리고 DPSI는 사후검사에서 안정성 값들이 더 크게 감소되었다. 태권도 선수들은 공격과 방어기술에 따라 순간적인 신체중심위치의 전·후 이동 및 체간의 기울기와 함께 발차기 동작은 엉덩, 무릎, 발목관절의 굴신운동이 매우 중요하게 작용된다(Chiodo et al., 2011; Ha, Yoon, & Kim, 2011; Ha & Kim, 2012). 또 굴신 움직임이 많은 운동에서는 COP의 ML방향보다 AP의 방향의 움직임조절이 주된 역할을 하며(Winter, Prince, Frank, Power, & Zabjda, 1996), 피로의 누적은 동

적 안정성과 균형 제어 능력 및 운동 제어 능력이 감소된다고 보고하였다(Johnston, Howard, Cawley, & Loss, 1998). 특히, Gribble & Hertel(2004)이 성인 여성 9명과 남성 4명에게 피로를 유발시킨 결과, ML COP에 차이는 없었지만, AP COP에 유의한 차이가 있다고 보고했다. 이와 같이, 본 연구의 남·여 태권도 선수들은 피로유발에 따라 좌·우 방향보다 전·후 방향에 대한 운동수행능력이 더 크게 작용되어 정적 안정성에 영향을 줄 수 있다고 사료된다.

이렇듯, 좌·우 방향의 COP와 MLSI 간(Figure 1: A) $r=.659$ 및 설명력은 48%로 유사한 정적 상관을 보이고 있지만, 피로에 따라 자세안정성에 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. Lee, Song, Young(2000)은 발목 염좌로 인한 외측 인대의 손상을 입는 초기기간을 급성기로 정의하였으며, 과훈련, 과사용, 그리고 과거에 부상이 재발되지 않을 경우 만성기로 정의하였고, 이중 74% 까지 만성 발목 불안정으로 발전 할 수 있다고 보고하였다(Anandacoomarasamy & Barnsley, 2005; Beynnon, Renström, Alosa, Baumhauer, & Vacda, 2001), 이러한 점들을 고려해 추후 연구에서는 피로유발과 함께 과거 염좌로 인한 외측 인대 손상 또는 훈련유형 등의 변인들을 더 면밀하게 조사하여 각 관계를 파악할 필요성이 있다고 생각된다.

COP area는 ΔCOP_x 와 ΔCOP_y 의 적분결과로 AP 방향에 대한 COP 움직임이 더 증가되어 면적 역시 증가 되는 높은 정적 상관관계를 보였다(Figure 1: C, $r=.614$, $R^2=37\%$). 이는 피로유발이 자세안정성 유지를 위해 COP 진동을 더 증가시키는 것으로, Kim, Shin, Jung, & Lee(2012)가 태권도 선수들의 정적안정성 변인 간 AP와 area 간 상관성이 높다는 연구와 유사한 결과이다. 또 Kim et al. (2012)의 연구에서 태권도 선수들의 피로유발에 따라 ML 방향과 area 간 높은 상관성을 보고했었는데, 본 연구에서 COP_x 는 통계적 유의한 차이는 없었으나, COP area와 COP_x 간(Figure 1: B) $r=.639$ 와 40%의 설명력으로 높은 상관을 나타냈다. 이렇듯, 운동상황에서 자주 사용하는 주축발의 자세유지는 선수들마다 차이가 있으며(Kim et al., 2012), AP 방향에 대한 COP가 area 확보에 큰 영향을 주고 있지만, ML 방향의 COP 움직임 역시 자세안정성 유지와 밀접한 관계가 있다고 판단된다.

태권도 선수들은 겨루기 시 점핑높이와 발차기 기술에 서로 차이가 있기 때문에 지면반력 성분들의 변화는 일정한 높이에서 드롭랜딩으로 평가하였다. 피로유발에 따라 ML GRF, AP GRF는 통계적으로 유의한 차이는 없었지만, PVF는 각각 4.43 N/BW에서 5.25 N/BW로, loading rate는 88.86 N/BW·sec⁻¹에서 122.93 N/BW·sec⁻¹로 피로유발 후 더 크게 통계적으로 유의한 차이가 나타났고, 두 변인 간 상관성은 $r=.719$, 설명력은 51%로 높은 정적상관을 나타냈다(Figure 1: D). 이에 태권도 겨루기에서 공격빈도와 부상위험이 높은 기술동작의 PVF 결과를 살펴보면, 공격목표에 따른 돌려차기 동작이 1.62-2.44 N/BW(Yang, 2001), 받아치기 시 돌려차기에서 우수집단은 1.09 N/BW, 비우수 집단은 1.29 N/BW(Ha et al., 2011), 54° 몸돌려 후려치기 시 3.14 N/BW(Lee, Kim, & Lee, 2014), 그리고 여자 태권도 선수들의 돌개차기 동작에서 왼발은 5.63 N/BW, 오른발은 1.78 N/BW으로 보고하였다(Park, 2012).

최대수직 지면반력 생성 시점에서 인체는 가장 큰 외력을 전달받기 때문에, 착지하는 동안 관절과 근육이 감당하기에 너무 큰 지면반력이 발생되면 부상이 발생할 수 있다(Cerulli, Benoit, Lamontagne, Caraffa, & Liti, 2003; Hootman, Dick, & Agel, 2007; Miyama & Nosaka, 2004). 본 연구결과와 비교해 볼 때 남·여 태권도 선수들에게 피로가 유발된 상태에서 무리한 착지동작이 발생되면 단위시간 당 신체가 받아들이는 충격력이 더 커지고 지면반력을 효과적으로 제어하지 못해 부상의 위험이 더 증가될 수 있다고 생각된다.

앞서 언급되었던 DPSI의 계산은 각 방향별 지면반력을 동일한 샘플 수로 적용되었다는 관점에서 피로유발에 따라 증가되는 PVF, loading rate의 증가형태와 VSI, 그리고 DPSI 간 $r=.600$ 과 43% 설명력 이상의 높은 정적 상관성을 보여주고 있다(Figure 1: E, F, G, H, I). 특히 VSI는 수직 힘 성분을 적용한 안정성지수의 결과물로 본 연구에서 PVF와 loading rate와 밀접한 관련이 있는 것을 확인할 수 있었다. Wikstrom et al. (2005)에 의하면 착지 단계에서 균형유지는 충격흡수가 반영되며, DPSI는 MLSI, APSI, VSI와 합이라는 계산을 고려할 때, VSI가 자세안정성 감소에 가장 큰 영향이 미치는 것으로 판단된다.

이처럼 태권도 선수들에게 점증적 운동부하 방식을 통해 유발된 피로는 수직 점프력, AP 방향에 대한 정적·동적 안정성을 감소시키는 동시에 신체가 받아들이는 충격유형은 더 증가되는 비례적인 관계로 분석되었으며, 선수들의 장시간 훈련 및 기술훈련 시 부상예방과 경기력 향상을 위한 정량적 자료로 제공될 수 있음을 시사한다.

CONCLUSION

본 연구는 태권도 선수들의 피로가 수직 점프력, 자세안정성, 그리고 지면반력 성분에 미치는 영향을 분석하기 위해 실시하였다. 정적안정성은 오른쪽 외발 서기를 실시하여 압력중심(COP)의 전-후(AP), 좌-우(ML) 방향에 대한 지수 값, 면적(area)을 분석하였고, 일정한 높이에서 드롭랜딩을 실시하여 3방향의 힘 성분(ML force, AP force, PVF)과 부하율, 그리고 동적자세안정성지수(MLSI, APSI, VSI, DPSI)를 파악하였다. 그 결과, 수직 점프력은 사후검사에서 더 감소되어 통계적 유의한 차이가 나타났다. 자세 안정성은 전-후 방향에 대한 AP COP, Δ COPy, COP area, APSI, VSI, DPSI에서 사전과 비교해 사후검사에서 더 크게 증가해 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 또 PVF와 부하율 역시 사후검사에서 더 크게 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 상관분석은 자세 안정성의 감소 및 지면반력 성분이 증가되는 형태 간 $r = .600$ 이상의 높은 정적상관이 있는 것으로 확인되었다.

피로유발에 따른 운동수행력 관련 데이터들은 경기력 향상을 목표로 하는 선수들에게 유용한 자료로 활용될 수 있다. 따라서 피로유발 관련 다양한 변이들 간의 관계가 조사되어야 하겠지만, 남성과 여성 별 대상자들을 추가적으로 더 모집하여 성별에 따른 운동역학적 변인들의 변화를 더 면밀하게 파악할 필요가 있다고 생각된다. 또 태권도가 체급경기로 구성되어 있어 대부분의 선수들이 체중감량을 경험하고 있는데, 피로유발과 체중감량 간의 관계를 규명하기 위한 후속연구가 이루어지길 제언한다.

CONFLICT OF INTEREST

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

REFERENCES

- Abidin, N. Z., & Adam, M. B. (2013). Prediction of vertical jump height from anthropometric factors in male and female martial arts athletes. *The Malaysian journal of medical sciences: MJMS*, 20(1), 39.
- Anandacoomarasamy, A., & Barnsley, L. (2005). Long term outcomes of inversion ankle injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 39(3), 14.
- Asmussen, E. (1979). Muscle fatigue. *Medicine and Science in Sports*, 11(4), 313.
- Beynon, B. D., Renström, P. A., Alosa, D. M., Baumhauer, J. F., & Vacek, P. M. (2001). Ankle ligament injury risk factors: a prospective study of college athletes. *Journal of Orthopaedic Research*, 19(2), 213-220.
- 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.
- 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.
- Boyas, S., & Guével, A. (2011). Neuromuscular fatigue in healthy muscle: underlying factors and adaptation mechanisms. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 54(2), 88-108.
- Boyas, S., Remaud, A., Bisson, E. J., Cadieux, S., Morel, B., & Bilodeau, M. (2011). Impairment in postural control is greater when ankle plantarflexors and dorsiflexors are fatigued simultaneously than when fatigued separately. *Gait & Posture*, 34(2), 254-259.

- 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.
- Butios, S., & Tasika, N. (2007). Changes in heart rate and blood lactate concentration as intensity parameters during simulated taekwondo competition. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 47(2), 179.
- Cerulli, G., Benoit, D. L., Lamontagne, M., Caraffa, A., & Liti, A. (2003). In vivo anterior cruciate ligament strain behaviour during a rapid deceleration movement: case report. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 11(5), 307-311.
- Chabran, E., Maton, B., & Fourment, A. (2002). Effects of postural muscle fatigue on the relation between segmental posture and movement. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 12(1), 67-79.
- Chiodo, S., Tessitore, A., Cortis, C., Lupo, C., Ammendolia, A., Iona, T., & Capranica, L. (2011). Effects of official taekwondo competitions on all-out performances of elite athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2), 334-339.
- Dizon, J. M. R., & Grimmer-Somers, K. (2012). Making filipino taekwondo athletes internationally competitive: an international comparison of anthropometric and physiologic characteristics. *Journal of Sports Medicine & Doping Studies*, 2(1), 105.
- Elsawy, G. (2010). Effect of functional strength training on certain physical variables and kick of twimeo chagi among young taekwondo players. *World Journal of Sport Sciences*, 3, 683-686.
- Estevan, I., Jandacka, D., & Falco, C. (2013). Effect of stance position on kick performance in Taekwondo. *Journal of Sports Sciences*, 31(16), 1815-1822.
- Fagenbaum, R., & Darling, W. G. (2003). Jump landing strategies in male and female college athletes and the implications of such strategies for anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(2), 233-240.
- Falcó, C., & Estevan, I. (2015). *Biomechanics in taekwondo: practical applications*. Performance optimization in taekwondo: From Laboratory to Field, 10.
- Fong, S. S., & Ng, G. Y. (2011). Does taekwondo training improve physical fitness?. *Physical Therapy in Sport*, 12(2), 100-106.
- Forestier, N., Teasdale, N., & Nougier, V. (2002). Alteration of the position sense at the ankle induced by muscular fatigue in humans. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(1), 117-122.
- Gastin, P. B. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine*, 31(10), 725-741.
- Gibson, H., & Edwards, R. H. T. (1985). Muscular exercise and fatigue. *Sports Medicine*, 2(2), 120-132.
- Gribble, P. A., & Hertel, J. (2004). Effect of hip and ankle muscle fatigue on unipedal postural control. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14(6), 641-646.
- Gutierrez, G. M., Jackson, N. D., Dorr, K. A., Margiotta, S. E., & Kaminski, T. W. (2007). Effect of fatigue on neuromuscular function at the ankle. *Journal of Sport Rehabilitation*, 16(4), 295.
- Ha, C. S., & Kim, J. G. (2012). The kinematic analysis of momdollyo huryo chagi in taekwondo. *The Korean Society of Sports Science*, 18(1), 1135-1144.
- Ha, C. S., Yoon, J. S., & Kim, J. J. (2011). The biomechanical analysis of the taekwondo in dollyochagi motion during the badachagi. *The Korean Society of Sports Science*, 20(4), 1187-1195.
- 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.

- Heller, J., Peric, T., Dlouha, R., Kohlikova, E., Melichna, J., & Novakova, H. (1998). Physiological profiles of male and female taekwon-do (ITF) black belts. *Journal of Sports Sciences*, 16(3), 243-249.
- 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), 311-319.
- Hssin, N., Ouergui, I., Haddad, M., Păunescu, C., Păunescu, M., & Chamari, K. (2015). *Injuries in Taekwondo*. performance optimization in taekwondo: From Laboratory to Field, 106.
- 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.
- Jo, C. K., & Kim, K. B. (2001). Comparative analysis on characteristics on body composition and cardiopulmonary function in highly trained taekwondo athletes. *The Korean Journal of Physical Education*, 40(2), 707-716.
- 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.
- Kang, D. K., Kang, S. J., & Yu, Y. J. (2013). A biomechanical analysis of 540° dwihuryeochagi of taekwondo. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 23(1), 19-24.
- Kang, H. S., Shin, C. H., & Chung, R. H. (2009). The effect of taekwondo training on aerobic capacity MVO₂, ST slope and QRS duration. *Korean Association of Physical Anthropologists*, 22(1), 39-46.
- Kazemi, M., Shearer, H., & Choung, Y. S. (2005). Pre-competition habits and injuries in taekwondo athletes. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 6(1), 26-29.
- Kim, H. D., Kim, D. H., & Shin, Y. S. (2011). Differential effects of taekwondo training on postural stability after fatigue induced by aerobic endurance exercise. *Exercise Science*, 20(3), 215-226.
- Kim, H. D., Shin, Y. S., Jung, S. W., & Lee, S. D. (2012). Effects of taekwondo training type and ankle fatigue on the development of static and dynamic postural stability. *The Korean Journal of Physical Education*, 51(5), 697-707.
- Kim, J. D. (1998). The comparative research of cardiopulmonary capacity and anaerobic threshold on taekwondo players and college women. *The Korean Society of Sports Science*, 7(1), 241-248.
- Kim, Y. K., & Kim, Y. H. (2010). Unilateral performance comparison for taekwondo kicks between dominant leg and non-dominant leg. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 20(2), 183-189.
- Kim, Y. K., & Youm, C. H. (2015). Effects of landing height and knee joint muscle fatigue on movement of the lower extremity during cutting after landing. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 25(3), 311-322.
- Lee, C. L., & Huang, C. (2013). Rotation movement analysis in taekwondo power breaking movement of 360° jump back kick. *In ISBS-Conference Proceedings Archive*, (Vol. 1, No. 1).
- Lee, K. T., Song, B. Y., & Young, K. W. (2000). Analysis of the injuries in professional soccer player. *The Korean Journal of Sports Medicine*, 18(2), 176-180.
- Lee, K. Y., Kim, J. T., Lee, J. S. (2014). The kinetics analysis between skilled and unskilled members doing a 540° turning back round kick of taekwondo. *The Korean Society of Sports Science*, 23(5), 1523-1533.

- Lee, S. Y., & Yoo, K. T. (2009). The effects of sports massage on hamstring and quadriceps after maximal exercise test. *Kinesiology*, 11(3), 41-51.
- Lystad, R. P., Pollard, H., & Graham, P. L. (2009). Epidemiology of injuries in competition taekwondo: A meta-analysis of observational studies. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(6), 614-621.
- Markovic, G., & Jaric, S. (2007). Is vertical jump height a body size-independent measure of muscle power?. *Journal of Sports Sciences*, 25(12), 1355-1363.
- Michell, T. B., Ross, S. E., Blackburn, J. T., Hirth, C. J., & Guskiewicz, K. M. (2006). Functional balance training, with or without exercise sandals, for subjects with stable or unstable ankles. *Journal of Athletic Training*, 41(4), 393.
- Miyama, M., & Nosaka, K. (2004). Influence of surface on muscle damage and soreness induced by consecutive drop jumps. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18(2), 206-211.
- Noorul, H. R., Pieter, W., & Erie, Z. Z. (2008). Physical fitness of recreational adolescent taekwondo athletes. *Brazilian Journal of Biomotricity*, 2(4), 230-240.
- Park, I. R., Jun, T. W., Park, K. S., Ryoo, B. K., & Choi, J. H. (2002). A study on the change of heart rate, blood lactate, blood pressure and MVO₂ in taekwondo athletes during taekwondo competition. *The Korean Journal of Physical Education*, 41(5), 613-621.
- Park, K. H., Youm, C. H., & Kim, Y. J. (2015). Effects of extensor fatigue levels of both knee joint and genders on vertical jump height and joint motions of lower extremities. *The Korean Journal of Physical Education*, 54(5), 815-828.
- Park, K. D. (2012). Kinetic analysis of the dolgaechagi motion in women's taekwondo. *The Korea Journal of Sports Science*, 21(6), 1519-1528.
- Pieter, W. (2005). Martial arts injuries. In epidemiology of pediatric sports injuries. *Medical and Scientific Publishers*, 48, 59-73.
- 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.
- Reiser, R. F., Rocheford, E. C., & Armstrong, C. J. (2006). Building a better understanding of basic mechanical principles through analysis of the vertical jump. *Strength & Conditioning Journal*, 28(4), 70-80.
- Roschel, H., Batista, M., Monteiro, R., Bertuzzi, R. C., Barroso, R., Loturco, I., Ugrinowitsch, C., Tricoli, V., & Franchini, E. (2009). Back issues. *Journal of Sports Science and Medicine*, 8, 20-24.
- Serina, E. R., & Lieu, D. K. (1991). Thoracic injury potential of basic competition taekwondo kicks. *Journal of Biomechanics*, 24(10), 951-960.
- So, I. C. (2007). The effect of aroma therapy on aerobic exercise capacity and blood fatigue factors of taekwondo athletes. *The Korean Journal of Physical Education*, 46(3), 553-561.
- Tokkovic, N. N., Blessing, D., & Williford, H. N. (2002). The effect of experience and gender on cardiovascular and metabolic responses with dynamic taekwondo exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 16(2), 278-285.
- Toskovic, N. N., Blessing, D., & Williford, H. N. (2004). Physiologic profile of recreational male and female novice and experienced taekwondo practitioners. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 44(2), 164.
- 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), 305-309.

- Winter, D. A., Prince, F., Frank, S. J., Powell, C., Zabjda, K. F. (1996). Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, 75(6), 2334-2343.
- Wojciechowska-Maszkowska, B., Borysiuk, Z., Wąsik, J., Janisiów, P., & Nawarecki, D. (2012). Effects of anaerobic fatigue on postural control in taekwondo practitioners. *Journal of Combat Sports & Martial Arts*, 3(2), 103-107.
- Yang, C. S. (2001). Effect of target height on ground reaction force factors during taekwondo and hapkido dollyuchagi motion. *The Korean Journal of Sport Biomechanics*, 11(2), 213-224.
- Zetaruk, M. N., Violan, M. A., Zurakowski, D., & Micheli, L. J. (2005). Injuries in martial arts: a comparison of five styles. *British Journal of Sports Medicine*, 39(1), 29-33.
- Ziaee, V., Rahmani, S. H., & Rostami, M. (2010). Injury rates in Iranian taekwondo athletes; a prospective study. *Asian Journal of Sports Medicine*, 1(1), 23-28.