Korean Journal of Sport Biomechanics
Vol. 21, No. 5, December 2011, 551-560

ISSN 1226-2226(Print), ISSN 2093-9752(Online)
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2011.21.5.551
http://www.kssb.or.kr

2011 대구 세계육상선수권대회 남자 장대높이뛰기경기 기술의 운동학적 분석

최규정[1] · 이경옥[2] · 김남희[2] · 강지은[2] · 김혜림[2]
[1]국민체육진흥공단 체육과학연구원 스포츠과학산업연구실 ·[2]이화여자대학교 건강과학대학 체육과학과

Kinematic Analyses of Men's Pole Vault in IAAF World Championships, Daegu 2011

Kyoo-Jeong Choi[1] · Kyung-Ok Yi[2] · Nam-Hee Kim[2] · Ji-Eun Kang[2] · Hye-Lim Kim[2]
[1] *Department of Sports Science & Engineering, Korea Institute of Sport Science, Korea Sports Promotion Foundation, Seoul, Korea*
[2] *Department of Human movement studies, College of Health Science, Ewha Womans University, Seoul, Korea*
Received 31 September 2011; Received in revised form 30 October 2011; Accepted 23 December 2011

ABSTRACT

The purpose of this study was to perform the kinematic analyses of the men's pole vault skills in IAAF World Championships Daegu 2011. Subjects were the 1st through 8th place finishers in the pole vault. The kinematic analyses were divided into four phases: two dimensional run up analysis, and three dimensional analyses for the remaining plant, swing up, and extension phases. Run-up variables consisted of run up distance, number of steps, average step length, the ratio of step length to his height, average velocity at the final 6~11 m, approach position. Three variables were analyzed during plant: pole angle, center of gravity (COG) velocity, and takeoff angle of COG. Swing up phase variables included: pole flexion angle, COG velocity (horizontal, vertical, resultant), COG trajectory and bar approach angle of COG. Compared to the 2009 World Championships in Berlin, the average vault height, run up velocity and approach position increased. However, horizontal velocity during the last two steps of the final approach decreased dramatically compared to speeds from 1990. These results reflect the change in both technique and improved physical fitness in pole vaulters. During extension, the peak height of COG averaged 0.3m higher then COG height when the pole was released. These specific results can help coaches and athletes modify training and improve performance.

Keywords: Men's pole vaulting, Run-up variables, Pole angle, Center of gravity (COG) velocity, COG takeoff angle, Pole flexion angle

Ⅰ. 서 론

2007년 3월 케냐 몸바사의 국제육상경기연맹(IAAF) 총회에서 대구광역시가 2011 세계육상선수권대회의 개최지로 선정됨으로써 우리나라는 3대 국제스포츠 이벤트를 모두 유치한 9번째 나라가 되었다. 이러한 국제대회유치는 스포츠강국으로서의 위상을 높이는 것은 물론 경기력 향상을 위한 자료수집의 중요한 기회가 될 수 있다. 아울러 세계육상선수권대회 종목별 경기내용을 분석하는 것은 각 종목별 우수선수의 기술정보를 직접 접하는 효과가 있고, 또한 이를 참조하여 경기력 향상훈련에 활용하는 것은 매우 유익한 일이 아닐 수 없어 그 필요성이 매우 높은 것으로 사료된다.

한편 우리나라 육상 경기력은 전반적으로 낮은 수준일 뿐만 아니라 학문적 관심도 낮은 편이다. 특히 장대높이뛰기에 관한 연구는 Ryoo(2003), Kim(2010) 등의 연구로 매우 제한적이며, 우리나라 최고기록(남자 5.63 m, 여자 4.40 m)도 세계기록(남자 6.14 m, 여자 5.06 m)과 많은 격차를 보이고 있다.

Corresponding Author: Kyoo-Jeong Choi
Korea Institute Sport Science
San223-19, Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, Korea
Tel : +82-2-970-9544 / Fax : +82-2-970-9502
E-mail: kjchoi@sports.re.kr
본 논문은 2011 대구세계육상선수권대회 운동역학 프로젝트로서 문화체육관광부와 대한육상경기연맹으로부터 지원을 받아 수행한 것임.

이러한 부진을 타개하기 위해 세계적인 선수의 기술을 과학적으로 분석하여 성공 요인을 규명하는 것은 경기력 향상을 위해 필요성이 매우 높다.

이에 본 연구는 2011 세계육상선수권대회 남자 장대높이뛰기 경기 본선에 참가한 선수 가운데 8 위 내에 입상한 선수의 성공사례를 대상으로 운동학적 분석을 실시하여 장대높이뛰기 단계별 동작과 관련된 주요 변인의 특성을 추출하고, 이를 과거 대회와 비교함으로써 장대높이뛰기 기술의 전반적인 변화 형태 또는 특성을 파악하는데 목적을 두었다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구 대상은 2011 대구세계육상선수권대회의 남자 장대높이뛰기 경기에 참가하여 결선에 진출한 16 명 중, 상위 8 명의 선수로 하였다. 본 연구 대상 8 명 결선에 참가한 16 명의 평균 연령은 24.6 세로 베이징(26.2세)보다는 1.6 세, 베를린(27.6)보다 3 세 적었고, 그들의 신체적 특성은 <Table 1>과 같았다.

2. 동작 구분

장대높이뛰기 기술은 체계적인 분석을 위하여 전체 기술을 4 또는 6단계로 구분하여 접근을 시도하였다(Frere 등, 2010; Petrov, 2004). 이 4 단계 구분은 조주단계, 도약단계, 장대 구부리기 단계, 장대 펴기 단계로 나누는 것으로서 가장 많이 사용되는 방법이다. 장대높이뛰기를 위해 달리는 마지막 발의 착지(touch down; TD1) 순간을 기점으로 그 이전 동작을 1단계, 조주(run up) 단계라 한다. 마지막 발의 착지 후, 장대를 폴 박스에 짚고(pole plant; PP), 지면에서 이륙(take-off; TO1)되는 순간까지를 2단계, 이륙단계라 한다. 이어서 장대가 최대로 구부러지는 순간(max. pole bend; MPB)까지 3단계, 장대 구부리기 단계라 한다. 장대를 펴고(pole straight; PS), 장대를 놓고(pole release; PR), 인체중심이 최고점(peak height; PH)에 이르며, 바를 넘는 구간을 4단계, 장대 펴기 단계라 한다<Figure 1>.

본 연구는 이 분류법을 근간으로 조주단계와 도약단계는 선행연구처럼 동일하게 구분하되, 조주 이후 동작은 다음과 같이 6개 주요 이벤트를 설정하여 분석하였다.

- 이벤트 1 : 마지막 발의 착지 순간 (조주 종료)
- 이벤트 2 : 발이 지면에서 이지되는 순간
- 이벤트 3 : 장대가 최대로 굽혀지는 시점
- 이벤트 4 : 장대가 곧게 펴지는 시점
- 이벤트 5 : 장대를 놓는 순간
- 이벤트 6 : 인체중심이 최대치를 보이는 시점

Table 1. Characteristics of subjects

Athlete	Rank	Height (m)	Age (year)	Record (m)
Wojciechowski P. (POL)	1	1.85	22	5.90
Borges L. (CUB)	2	1.78	25	5.90
Lavillenie R. (FRA)	3	1.76	25	5.85
Michalski L. (POL)	4	1.89	23	5.85
Mohr M. (GER)	5	1.92	25	5.85
Filippidis K. (GRE)	6	1.88	25	5.75
Didenkow M. (POL)	7	1.80	24	5.75
Silva F. (BRA)	8	1.78	28	5.65
Mean ± SD		1.83 ± 0.06	24.6 ± 1.8	5.81 ± 0.09

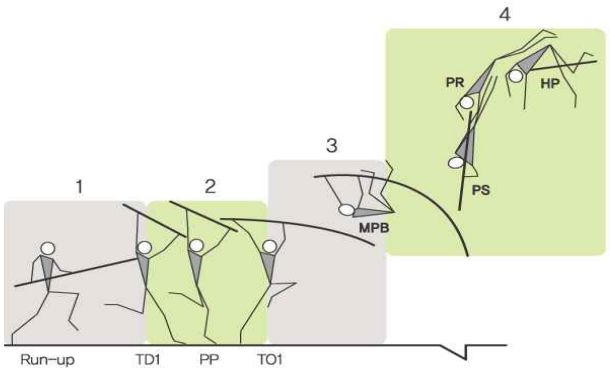

Figure 1. Four phases of pole vault (Frere, 2010)
TD1; the last touch down, pp; pole plant, TO1; the last toe-off, MPB; max. pole bend, PS; pole straight, PR; pole release, PH; peak height

3. 연구내용

남자 장대높이뛰기 구간별 기술 분석을 위하여 다음과 같은 분석요인을 설정하였다.

- 조주 단계 : 전체 조주거리, 스텝 수, 평균 보폭 및 신장 대비 비율, 폴 박스로부터 5 - 10 m 구간의 평균 속도, 도약위치(폴 박스 기준)
- 도약 단계 : 장대 꽂기 각도, 인체중심의 이동 속도, 인체중

심의 이륙 각도
- 장대 구부리기 및 펴기 단계 : 장대 굴곡 각도, 인체중심의 이동속도(수평, 수직, 합성), 바 접근 각도 등

4. 연구 방법

2011 대구 세계육상선수권대회 남자 장대높이뛰기 경기에 참가한 모든 선수(27 명)의 예선, 결선 경기를 비디오카메라 5 대를 이용하여 60 Hz로 촬영하였고, 그중 최종 상위권 8 명을 분석하였다. 비디오카메라 2 대(cam 1, 2)는 조주구간을 전・후반부로 나누어 측면에서, 2 대(cam 3, 4)는 경기장(A, B) 전 구간을 정면에서 촬영하였다. 나머지 1 대(cam 5)는 전체 동작과 기록 수집에 활용하였다<Figure 2>. 경기시작 약 4 시간 전에 통제점 틀<Figure 3>을 설치하여 촬영하였고, 조주단계는 2D, 이후 도약단계부터 바를 넘는 동작은 3D DLT 방법을 통하여 분석하였다.

예선경기는 2011년 8월 27일 A, B 두 그룹으로 나뉘어 진행되었다. 예선 참가자 가운데 IAAF 선정(2011년 8월 기준) 톱 10 선수 중 7 명이 포함되었고, 모두 결선에 올랐다. 결선 진출 기준기록(qualification height)은 5.70 m로서 2008 베이징올림픽대회와 2009 베를린 세계육상선수권대회의 5.75 m보다 낮았다. 바 높이는 5.20 m에서 시작하여 5.35, 5.50, 5.60, 5.65 m로 증가시켜 5.65 m에서 결선 진출자 16 명이 확정되었다. 베이징올림픽대회에서는 바의 높이를 5.15, 5.30, 5.45, 5.55, 5.65 m로 증가시켜 12 명이, 베를린 세계육상선수권대회에서는 5.25, 5.40, 5.55, 5.65 m로 증가시켜 11 명이 결선에 진출하였다. 바의 첫 높이는 베이징(5.15 m)보다 5 ㎝ 높게, 베를린(5.25 m)보다 5 ㎝ 낮게 시작하였지만, 세 대회 모두 5.65 m에서 결선 진출자가 가려졌다. 결선경기는 2011년 8월 29일, 16 명의 선수가 A 조, 한 그룹에 편성되어 한 경기장만을 사용하여 경기가 진행되었다.

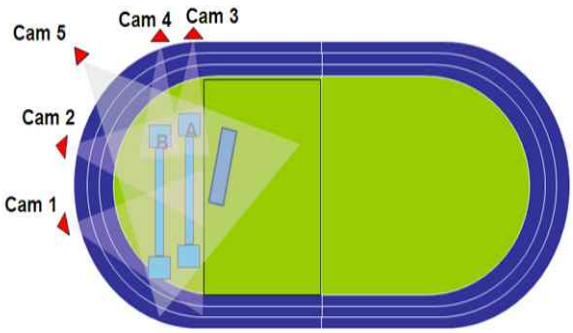

Figure 2. The layout of cam 1~5

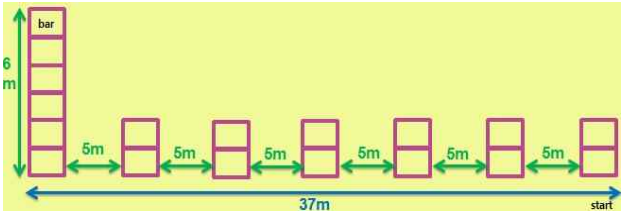

Figure 3. The layout of control objects for DLT calibration

5. 자료처리

결선 경기결과, 상위 8 명의 최종 성공 시기 영상자료를 대상으로 Kwon3D 3.0 프로그램(Kwon, 2002)을 이용하여 3차원 좌표 값을 산출하였다. 디지타이징을 통하여 얻은 원자료(raw data)는 Butterworth 저역 통과 디지털 필터(digital low-pass filter)를 사용하여 평활(smoothing) 하였고, 차단주파수(cut-off frequency)는 6 Hz로 하였다. 그리고 산출된 분석요인은 기술통계를 사용하여 처리하였다.

Ⅲ. 연구 결과

대구 세계육상선수권대회 남자 장대높이뛰기 결선경기 1-8위의 최종 성공시기에 대한 영상분석 결과는 조주 단계, 도약단계, 그리고 장대 구부리기 및 펴기의 4 단계로 구분하여 제시하였다.

경기기록은 선수 컨디션에 따라 변하므로 대구대회 결과가 개인 최고기록(personal best; PB) 또는 연간 최고기록(season best; PB)과 비교하여 어느 수준인지를 평가하였다<Table 2>. 결선에 오른 선수 중, 2명(M. Mohr와 K. Fillippidis)이 시즌 최고기록을 수립하였고, 2명(L. Borges와 L. Michalski)은 개인 최고기록을 수립하였다.

Table 2. Competition results in relation to season's best 2011 (before the World Championships)

Rank	SB 2011 (m)	PB (m)	Record (Daegu)	Differe -nce (%)
1	5.91	5.81	5.90	- 0.2
2	5.75	5.75	5.90	+ 2.6
3	5.90	6.01	5.85	- 0.8
4	5.75	5.80	5.85	+ 1.7
5	5.81	5.90	5.85	+ 0.7
6	5.73	5.75	5.75	+ 0.3
7	5.75	5.75	5.75	0.0
8	5.80	5.80	5.65	- 2.6

1. 조주단계

장대높이뛰기 전 조주구간의 총 조주거리, 스텝 수, 평균 보폭, 신장에 대한 비율을 구하여 제시하였다<Table 3>. 연구대상인 1 - 8 위 선수 중, 4 명<Table 3에 음영된 선수>은 조주단계 초기 영상자료가 다른 선수에 가려 정확히 분석할 수 없었기 때문에 해당 스텝을 제외한 거리를 제시하였다. 따라서 전체 조주거리의 평균치는 줄어들었고, 평균 보폭과 신장 대비 비율은 대부분 선수가 초기 조주단계에서 보폭을 짧게 시작하기 때문에 초기의 짧은 보폭이 제외되어 평균치가 다소 커졌으며, 또한 이 값의 신장에 대한 비율도 다소 커진 결과이다.

Table 3. Athlete's height, total run-up distance, number of run-up steps, average step length and the ratio to his height

Rank	Height (m)	Total Distance (m)	# of steps (step)	Average Step Length (m)	Ratio (%)
1	1.85	33.34	16 (SS)***	1.96	106.0
2	1.78	34.04 *	20	2.27 **	127.5
3	1.76	33.59 *	18	2.10 **	119.3
4	1.89	34.20 *	18 (SS)***	2.14 **	113.2
5	1.92	35.62	16	2.23	116.2
6	1.88	37.35	18	2.08	110.6
7	1.80	33.42	16 (SS)***	1.97	109.4
8	1.78	30.43 *	18	2.03 **	114.0
M ± SD	1.83 ± 0.06	34.00 ± 1.93	17.5 ± 1.30	2.10 ± 0.13	114.5 ± 6.66

* the total run-up distance is not exactly correct due to disturbances of first 1-2 step
** average step length has obtained except the first 1-2 step, so slightly higher than real, and the ratio to his height is slightly higher, too.
*** additional 1 short step for preparation first step

Table 4. Average step length for the section of 15-11 step, 10-6 step and 5-1 step

(m)

Rank	Hei -ght	Average step length (ratio *)		
		Last 15 - 10 step	Last 10 - 6 step	Last 5 - 1 step
1	1.85	1.88 (101.6)	2.21 (119.5)	2.04 (110.3)
2	1.78	2.42 (136.0)	2.24 (125.8)	2.15 (120.8)
3	1.76	2.05 (116.5)	2.17 (123.3)	2.09 (118.8)
4	1.89	2.09 (110.6)	2.20 (116.4)	2.20 (116.4)
5	1.92	2.25 (117.2)	2.31 (120.3)	2.19 (114.1)
6	1.88	2.00 (106.4)	2.26 (120.2)	2.21 (117.6)
7	1.80	1.90 (105.6)	2.20 (122.2)	2.07 (115.0)
8	1.78	1.94 (109.0)	2.11 (118.5)	2.04 (114.6)
M ± SD	1.83 ± 0.06	2.07 (112.8) ± 0.19	2.21 (120.8) ± 0.06	2.12 (115.9) ± 0.07

* represents the ratio of step length to his height

조주를 시작하여 마지막 발을 착지한 순간까지의 총 조주거리 평균은 34.0 m이었다. 총 스텝 평균은 17.5 보로 2009 베를린대회(18.2 보)보다 감소하였다. 평균 보폭은 2.10 m, 그리고 신장 대비 비율은 114.5 %였다.

전체 조주구간을 전반부(마지막 15-11 보), 중반부(마지막 10-6 보), 후반부(마지막 5-1 보)로 나누어 가속을 위한 보폭의 변화 형태를 조사하였다<Table 4>. 경기에 사용하는 스텝 수가 선수마다 다르기 때문에 가속 구간을 일률적 기준(5, 10, 15 보)으로 전, 중, 후반부로 구분하는 것이 정확하지 않은 것으로 사료되지만, 조주 초반부의 스텝은 예비동작에 해당되므로 이를 제외시키면 거의 유사한 형태로 간주할 수 있다.

초반부의 평균 보폭은 2.07 m(신장 대비 112.8 %), 중반부는 2.21 m(신장 대비 120.8 %)로 증가하였다. 그리고 후반부에서는 2.12 m(신장 대비 115.9 %)로 약간 감소하였다. 우승자인 폴란드 P. Wojciechowski 선수의 각 스텝별 보폭의 막대그림을 <Figure 4>에 참고로 제시하였다.

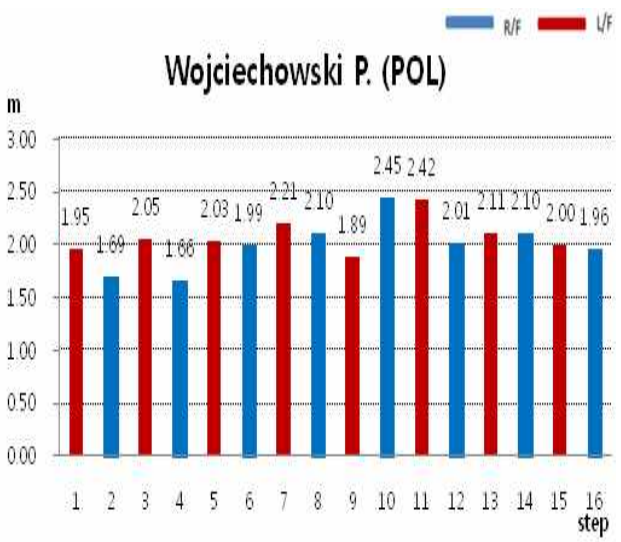

Figure 4. Each step length for run-up (P. Wojciechowski)

<Table 5>는 2009 베를린 세계육상선수권대회와 2011 대구 세계육상선수권대회의 결선경기에 참가하여 8 위 이내에 포함된 남자선수들의 장대높이뛰기 기술에 관련된 요인 - 경기 기록, 조주 스텝 수, 조주속도(6 - 11 m 조주구간의 평균 속도), 도약 지점(폴 박스를 기준으로 하여 마지막 착지발의 위치) - 등에 관한값을 나타낸 것이다.

2011 대구 세계육상선수권대회의 평균기록은 5.81 m로서 2009 베를린대회(5.75 m)와 베이징올림픽대회(5.73 m)보다 각각 6 , 8 ㎝ 증가하였다. 조주속도는 9.26 m/s로 2009 베를린대회(9.18 m/s)보다 0.08 m/s 증가하였다.

장대높이뛰기에 포함된 기술이 다른 육상 종목에 비해 많기

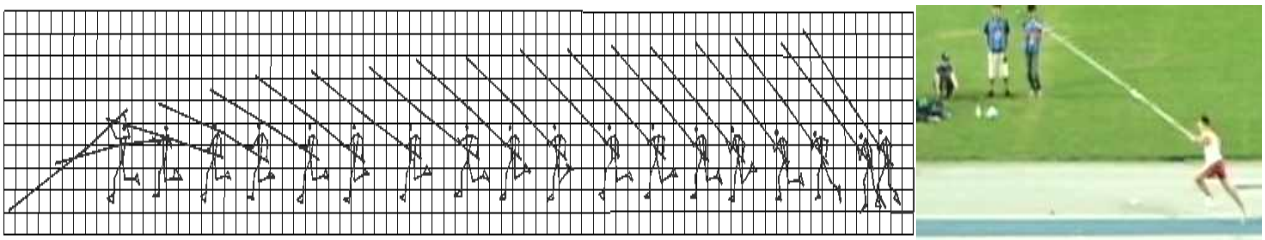

Figure 5. Stick figure and photo of Wojciechowski P. (POL)

Table 5. Jumping height, run-up velocity VA in section 11-6m, number of run-up steps and take-off position AP

IAAF WCh Berlin 2009					IAAF WCh Daegu 2011				
athlete	Records (m)	# of Steps (step)	VA (m/s)	AP (m)	Athlete	Records (m)	# of Steps (step)	VA * (m/s)	AP ** (m)
Hooker, S. (AUS)	5.90	18	9.24	4.35	Wojciechowski P. (POL)	5.90	16 (SS)***	9.05	4.50
Mesnil, R. (FRA)	5.85	18	8.99	4.15	Borges L. (CUB)	5.90	20	9.48	4.55
Lavillenie, R. (FRA)	5.80	20	9.54	4.65	Lavillenie R. (FRA)	5.85	18	9.63	4.79
Mazuryk, M. (UKR)	5.75	18	9.12	4.30	Michalski L. (POL)	5.85	18 (SS)***	9.09	4.51
Gripich, A. (RUS)	5.75	16	8.73	4.25	Mohr M. (GER)	5.85	16	9.05	4.47
Dossevi, D. (FRA)	5.75	20	9.35	3.60	Filippidis K. (GRE)	5.75	18	9.34	3.80
Gibilisco, G. (ITA)	5.65	18	9.07	4.25	Didenkow M. (POL)	5.75	16 (SS)***	9.09	4.48
Straub, A. (GER)	5.65	18	9.35	4.20	Silva F. (BRA)	5.65	18	9.31	4.45
Lewis, S. (GBR)	5.65	18	9.24	4.25					
M ± SD	5.75 ± 0.09	18.22 ± 1.20	9.18 ± 0.24	4.22 ± 0.27	M ± SD	5.81 ± 0.09	17.5 ± 1.30	9.26 ± 0.22	4.44 ± 0.28

* the velocity has analyzed in the run-up section between 11 -6m from the cut-in box
** AP has analyzed the distance between cut-in box and the last heel strike
*** additional 1 short step(SS) for preparation first step

때문에 조주 속도 한 요인만을 가지고 경기력을 예측하기 어려운 측면이 있지만, 조주속도가 경기력과 높은 상관관계를 보인다는 연구결과(Adamczewski와 Perlt(1997)를 감안하면 긍정적 변화라고 평가할 수 있었다. 도약 지점은 베를린대회(4.22 m)에 비해 대구대회(4.44 m)가 폴 박스에서 평균 0.22 m 멀어졌다. 이는 베를린대회 결과를 2007년 슈투트가르트대회와 비교한 보고에서 0.23 m 멀어졌다는 결과와 유사한 것으로서 선수들의 그립이 더 높은 위치에 있다는 것을 의미하기 때문에 역시 긍정적인 것으로 평가되었다.

R. Lavillenie(FRA, 3위)의 도약 지점(4.79 m)은 베를린대회와 같이 가장 큰 값을 보였으며, 그도 역시 베를린대회(4.65 m)보다 14 ㎝ 증가한 값을 보였고, 2011 대구대회에서도 역시 free take-off 기술을 사용하였다. 2011 대구 세계육상선수권대회 우승자 폴란드 P. Wojciechowski 선수의 전체 조주구간의 이동형태를 막대그림(stick figure)으로 제시하였다<Figue 5>.

2. 도약 단계

두 손에 들고 달려온 장대를 폴 박스에 꼽는 것은 마지막 발을 착지한 다음 이루어지며, 장대를 폴 박스에 꼽을(PP) 때, 장대가 지면과 이루는 각을 PP 각도라 명명하였다. 본 연구에서는 (Table 6)에서 보는 바와 같이 PP 각도가 약 24° - 31° 범위였으며, 평균 26.3°를 보였다. Frere(2010)는 선수의 근력이 클수록 PP 각도가 크게 나타난다고 하였다.

또한 Linthorne(2000), Arampatzis 등(1999, 2004)은 조주 마지막 발의 착지(TD 1)로부터 그 발의 이륙 순간(TO 1)까지를

Table 6. The angle of pole at pole plant (degree)

R	1	2	3	4	5	6	7	8	M±SD
각도	25.8	26.5	23.8	28.1	26.9	30.8	25.3	23.6	26.3±2.3

도약 구간으로 설정하고, 이 단계에서 운동에너지 감소를 볼 수 있는데, 이는 조주 마지막 발의 착지 순간(TD 1)에서 하지 수직속도 증가를 위해서, 그리고 동체와 상지를 이용하여 장대를 폴 박스에 꽂고 장대를 구부리기 위해 발생한다고 하였다.

도약 단계에서는 폴 박스에 장대를 짚는 순간 수평속도의 감소가 생기고, 수직속도가 상승한다. 멀리뛰기처럼 마지막 스탠스에서 최적의 이륙각도를 만들기 위해 수직성분을 증가시키기 때문이다. 대구세계육상선수권대회의 조주속도 감소량을 분석한 결과<Table 7>, TD 2 - TD 1 사이에는 평균 0.16 m/s 감소하였다. 이는 과거에 비해 조주구간 속도 감소량이 현저히 줄어드는 기술적 변화를 보인 결과다. 그리고 TD 1 - TO 1 구간에서도 평균 0.85 m/s 감소하여 마지막 1 - 2 스텝에 따른 속도 감소처럼 감소량이 줄어드는 경향을 보였다.

인체중심 이동속도의 수직, 수평 성분을 이용하여 이륙 각도를 구하였다<Table 8>. 이륙 순간(TO 1) 속도는 지면과 Θ의 각(이륙각도, 투창의 릴리즈 각도와 유사함)을 이룬다.

2011 대구세계육상선수권대회에서는 마지막 착지발이 이륙하는 순간 인체중심이 바를 향해 도약하는 각도가 약 10° - 19° 범위의 값을 보였다.

Table 7. The difference of velocity

(m/s)

Rank	Velocity			Difference	
	TD2 (1)	TD1 (2)	TO1 (3)	(1)-(2)	(2)-(3)
1	9.10	9.03	8.16	0.07	0.87
2	9.52	9.19	8.46	0.33	0.73
3	9.70	9.47	9.01	0.23	0.46
4	9.03	9.06	8.57	0.03	0.49
5	8.83	9.13	7.54	0.30	1.59
6	9.43	8.69	7.56	0.74	1.13
7	9.13	9.03	7.81	0.10	1.22
8	9.27	9.15	8.77	0.12	0.38
M ± SD	9.25 ± 0.29	9.09 ± 0.22	8.24 ± 0.56	0.16 ± 0.30	0.86 ± 0.43

3. 장대 구부리기 및 펴기 단계

장대 구부리기 및 펴기 단계는 장대 지지 국면과 비행 국면을 모두 포함하는 구간으로서 역학적 에너지가 변환되는 과정이 연결되기 때문에 하나의 과정으로 분석하였다.

장대가 최대로 구부러지는 순간(이벤트 3)의 장대 굴곡 각도는 약 100° 정도였다<Table 9>. 3 위를 차지한 Lavillenie는 83°로 장대를 가장 많이 구부린 선수였다. 그는 그만큼 많은 에너지를 장대에 축적한 것으로 평가될 수 있었다.

장대를 편 후 바를 넘기 위해 장대를 아래 방향으로 다시 한번 더 밀어 내면서 인체중심의 위치를 더욱 높이는 동작이 필요하다. 이것은 장대를 놓기 직전에 장대가 다시 약간 구부러지는 현상을 통해 입증되었다(Choi, 2011). 본 연구에서는 1, 2, 3, 5위를 차지한 4명의 선수에게서 이러한 현상을 볼 수 있었다.

Table 8. The angle of take-off on COG

(degree)

Rank	event 1 (TD)	event 2 (TO1)
1	5.9	14.3
2	10.1	19.0
3	3.7	10.0
4	3.0	14.3
5	5.7	14.4
6	1.5	10.7
7	4.5	13.5
8	7.1	13.4
M ± SD	5.2 ± 2.67	13.7 ± 2.73

Table 9. The angle of pole bended

(degree)

Rank	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
1	101.3	167.6	166.4	164.8
2	101.9	174.8	176.7	177.1
3	83.3	135.5	164.2	163.3
4	95.2	152.2	177.8	178.7
5	97.9	171.8	174.7	172.0
6	98.1	175.7	179.1	179.0
7	96.8	168.9	169.0	169.4
8	91.9	173.1	176.1	176.1
M ± SD	95.8 ± 5.98	164.9 ± 14.03	173.0 ± 5.65	172.5 ± 6.19

장대를 최대로 구부렸다가(이벤트 3) 다시 장대를 곧게 펴고(이벤트 4) 바를 넘을 때까지 수평-수직속도 성분을 구하여 <Table 10>에 제시하였다. 7 위를 차지한 Didenkow 선수를 제외하고 모두 장대가 최대로 구부러진 시점(이벤트 3)에서 수평속도가 수직속도보다 높은 값을 보였으며, 두 성분의 차이는 평균 약 1 m/s였다. 1위를 차지한 Wojciechowski는 수평, 수직속도의 차이가 1.27 m/s였다.

구부러진 장대가 펴지는 동안에는 수평속도가 <fig. 6>처럼 줄어들었고, 바를 넘기 위해 장대를 놓는 순간(이벤트 5)에도 수평속도는 1.42 m/s 였으며, 이는 바를 넘는데 이용 된다. 장대를 놓은 다음 인체중심이 최대인 시점(이벤트 6)에서는 평균 1.26 m/s<Table 10>의 수평속도가 남아 있었다. 만일 이 성분이 부족하면 선수는 장대를 넘지 못하고, 장대 앞에서 떨어지게 된다. MPB 이후 수평속도 변화 형태를 상위 3 명에 대해 <Figure 6>에 제시하였다.

Table 10. Horizontal & vertical velocity of COG (m/s)

R	Event 3		Event 4		Event 5		Event 6	
	H	V	H	V	H	V	H	V
1	3.44	2.17	1.71	4.33	1.65	3.29	1.13	0.27
2	2.45	3.24	2.00	4.33	1.56	1.51	1.49	0.34
3	3.71	1.32	1.70	5.20	1.30	2.62	1.15	1.09
4	3.07	1.92	1.37	4.85	1.27	1.91	1.05	0.38
5	4.17	2.36	2.04	4.94	1.94	2.70	1.55	1.03
6	3.80	2.07	1.40	4.54	1.28	2.21	1.07	0.48
7	2.58	2.86	1.80	4.74	1.16	2.17	1.46	0.34
8	2.89	2.07	1.24	4.85	1.23	2.71	1.21	0.02
M ± SD	3.26 ± 0.61	2.25 ± 0.59	1.66 ± 0.30	4.72 ± 0.30	1.42 ± 0.27	2.39 ± 0.55	1.26 ± 0.20	0.49 ± 0.37

H : Horizontal Velocity, V : Vertical Velocity

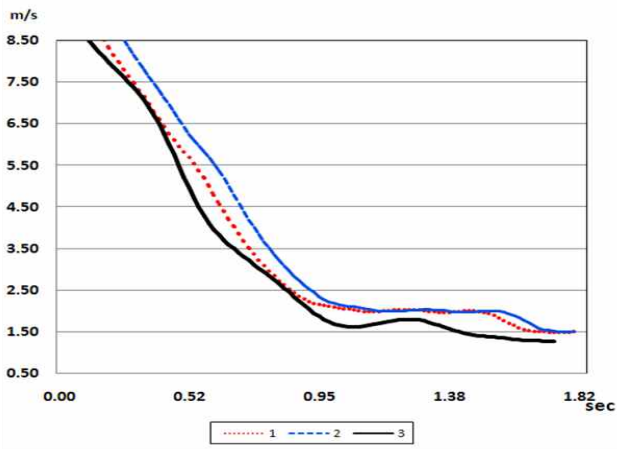

Figure 6. The horizontal velocity of COG after MPB for 1, 2, 3 rankers

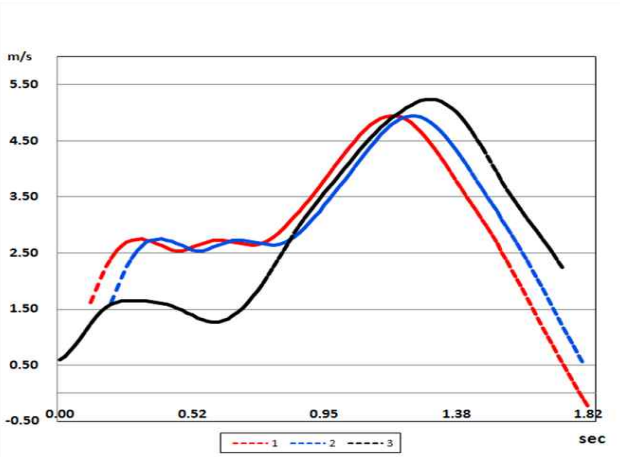

Figure 7. The vertical velocity of COG after MPB for 1, 2, 3 rankers

장대가 펴지는 동안(이벤트 3 - 4) 수직속도는 증가하는 형태를 보이며<Table 10, Figure 7>, 최대 수직속도는 장대가 곧게 펴지는 순간(PS)에 나타났다.

수직속도가 가장 높게 나타난 선수는 3위를 차지한 Lavillenie 선수(5.2 m/s)로서 그는 장대를 가장 많이 구부려 장대에 많은 탄성에너지를 비축하였고<Table 9>, 이를 수직 위치 에너지로 변화시킨 결과로 해석되었다. 하지만 높은 수직속도와 장대의 굴곡 각도에 비해 경기기록이 낮은 것은 에너지 활용 측면에서 비효율성 또는 기술적 결함을 의미하는 것으로 사료되어 정밀 분석을 통한 개선이 필요한 것으로 사료되었다. MPB 이후 상위 3명의 수직속도 변화 형태를 <Figure 7>에 제시하였다.

인체중심 높이는 장대가 펴지는 동안 계속 높아지는 형태를 보였다<Table 11>. 이처럼 인체중심이 상승하여 장대를 놓는 순간(이벤트 5)보다 인체중심의 위치가 가장 높은 시점(이벤트 6)에는 인체중심이 약 0.31 m 상승하였다.

특히 3 위를 차지한 Lavillenie 선수는 가장 높은(6.16 m) 인체중심의 위치를 가지고 있지만, 기록은 5.80 m로 최고 중심의 높이와 0.36 m<Table 12>의 많은 차이를 보였다. 이는 이 선수의 발전 가능성을 예고하는 요인으로 사료되어 관심의 대상이었다.

Table 11. The height of COG (m)

Rank	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
1	2.25	4.74	5.18	5.84
2	1.95	4.84	5.79	5.90
3	1.91	4.44	5.84	6.16
4	2.16	4.51	5.78	5.95
5	2.11	4.53	5.64	5.95
6	1.96	4.60	5.52	5.81
7	2.58	4.53	5.64	5.87
8	2.28	4.61	5.55	5.97
M ± SD	2.15 ± 0.22	4.60 ± 0.13	5.62 ± 0.21	5.93 ± 0.11

Table 12. The height of COG at event 5 (peak height) & his record in Daegu (m)

	1	2	3	4	5	6	7	8	M	SD
PH	5.98	5.90	6.16	5.95	5.95	5.81	5.87	5.97	5.93	0.11
Record	5.90	5.85	5.80	5.75	5.75	5.75	5.65	5.65	5.76	0.09

IV. 논의

2011 대구 세계육상선수권대회 남자 장대높이뛰기 경기에 대한 분석결과를 2009년 베를린대회 및 선행연구결과와 비교, 고찰하였다.

우선 조주단계에서 조주속도가 9.26 m/s로 분석되었고, 이는 2009 베를린대회(9.18 m/s)보다 0.08 m/s 증가한 것이었다. 조주 속도 요인만을 가지고 경기력을 예측하기 어려운 측면이 있지만, Adamczewski와 Perlt(1997)가 제시한 것처럼 남자 수평 조주속도와 경기기록은 r = 0.69의 비교적 높은 상관관계가 있다는 점을 감안하면 대구대회에서 보여준 결과가 경기력 측면에서 긍정적인 변화라고 할 수 있었다.

그리고 도약 지점도 베를린대회(4.22 m)에 비해 대구대회(4.44 m)가 평균 0.22 m 길어졌다. 2009 베를린대회와 2007년 슈투트가르트대회를 비교한 보고에서 0.23 m 길어졌다는 보고처럼 선수들의 그립이 더 높은 위치에 있다는 것을 의미하기 때문에 역시 긍정적인 것으로 평가되었다. R. Lavillenie(FRA, 3위)은 free take-off 기술을 사용하는 선수로서 8 명의 선수 가운데 베를린대회와 같이 가장 긴 도약 지점(4.79 m)을 보였으며, 그도 역시 베를린대회(4.65)보다 14 ㎝ 증가한 값을 보였다.

조주 구간 끝 부분에서 장대를 폴 박스에 꼽을(PP) 때, 장대가 지면과 이루는 각(PP 각도)은 선수 개인의 근력이 클수록 각이 크다고 하였지만(Frere, 2010), 본 연구대상이 보인 24° - 31°(평균 26.3°) 각도는 그들의 근력자료가 없어 근력과 연결시켜 해석하기 어려웠다. 그리고 Linthorne(2000), Arampatzis 등(1999, 2004)은 도약구간에서 운동에너지 감소를 볼 수 있으며, 장대가 휘는 것은 장대와 선수 사이에 에너지 교환이 일어난 증거이고, 운동에너지가 장대의 탄성에너지로 변환된 것이라고 하였다.

도약 단계에서는 폴 박스에 장대를 짚는 순간 수평속도는 감소, 수직속도는 상승한다. 수평속도 감소와 관련된 선행연구를 살펴보면, Gros & Kunkel(1990)는 ′88서울올림픽 금메달리스트(5.90 m 기록)를 대상으로 마지막 1 - 2 스텝(TD 2 - TD 1) 사이의 감속이 약 2 m/s(9.86 - 7.90)라고 하였다. Angulo-Kinzler 등(1994)은 ′92 바르셀로나올림픽 금메달리스트(5.80 m 기록)를 대상으로 감속이 약 2 m/s(9.74 - 7.74)라고 하였으며, McGinnis(1987)도 5.50 - 5.81 m 기록을 가진 16 명의 선수를 대상으로 측정한 결과 수평속도가 약 2 m/s 감소한다고 보고하였다. 두 연구 결과와 약간 다르게 Durey(1997)는 5.50 m 기록을 가진 프랑스 우수선수 3 명을 대상으로 TD 1-TO 1 구간을 측정한 결과, 0.9 - 1.8 m/s 감소한다고 하였다.

이러한 선행연구결과와 비교하여 대구대회의 감소량이 평균 0.16 m/s 감소한 것은 과거에 비해 도약단계에서 수평속도 감소량이 현저히 줄어드는 기술적 변화를 보인 결과로 해석된다. 그리고 TD 1 - TO 1 구간에서도 적게 감소(평균 0.86 m/s)하여 마지막 1 - 2 스텝에서의 수평속도 감소량도 줄어드는 기술적 향상을 보인 것으로 해석되었다.

도약구간이 끝나고 이륙하는 순간(TO 1) 인체중심은 바를 향해 도약하기 위해 일정 각도를 갖는다. Morlier와 Mesnard(2007)는 그립의 위치(높이)에 따라 장대에 가한 힘이 다르며, 그립 위치가 높을수록 힘의 합성성분은 전 - 하 방향으로 작용하고, 낮을수록 전 - 상 방향을 향한다고 하였다. Linthorne(2000)은 이륙 국면에 대한 수학적 모델을 세우고 탄성이 있는 장대를 사용할 때(1994년에는 구부러지지 않는 장대에 대한 모델 연구) 최적 이륙각도 추정치는 18°라 하였으며, 이 단계에서 이륙속도(인체중심의 합성속도)가 감소하고, 이륙각도는 증가한다고 하였다. 본 연구에서는 도약 각도가 약 10° - 19° 범위의 값을 보임으로써 Linthorne(2000)의 추정치와 같은 경향을 보이지는 않았지만, 유사한 범위의 값을 보이는 경향은 보였다. Durey(1997)와 Morlier(1999)는 이륙 각도에 대해 첫째, 선수가 수평속도 성분의 손실을 줄이기 위해 전방으로 향하기 때문이며, 둘째, 장대가 구부러지기 시작하면서 선수의 이동속도가 현저히 줄어드는 것으로 해석하였다.

장대 구부리기 및 펴기 단계는 역학적 에너지가 변환되는 과정이 연결되기 때문에 하나의 과정으로 분석하기도 한다. 이때 장대의 굴곡 각도는 에너지 비축측면에서 중요한 요인으로 간주되는데, Shade (2006), Shade 등 (2000, 2006)은 남자 선수의 경우 최대 도약높이가 인체중심이 가장 높은 순간 최대 역학적 에너지와 r = 0.88이라는 매우 유의한 상관관계가 있다고 하였다. 또한 Shade 등(2006)은 에너지 변환 과정에서 이득을 보기 위해서는 손목이나 고관절보다 어깨 관절을 이용한 일량을 증가시킬 것을 권하여, 어깨 관절의 중요성을 강조하였다. 즉, 장대를 곧게 편 후 바를 넘기 위해 장대를 아래 방향으로 다시 한 번 더 밀어 내면서 인체중심의 위치를 더욱 높이는 기술로서(Choi, 2011) 본 연구에서 1, 2, 3, 5위 4명의 선수에게서 나타났으며, 상위선수일수록 이 기술을 잘 활용하는 것으로 해석되었다.

장대가 펴지는 동안의 수평-수직속도 성분에 대해 Frere (2010)는 장대가 최대로 구부러질 때까지는 수평속도가 수직속도보다 크며, 장대가 펴지는 동안에는 수직 속도가 수평 속도보다 커야함을 강조하였다. 본 연구에서는 7 명의 선수(7 위 제외)가 이러한 경향을 보였다.

또한 Frere(2010)는 장대가 펴지는 동안 수평속도가 줄고, Petrov(2008)는 인체중심이 최대인 시점(PH)에서는 평균 1.5 - 2.0 m/s의 수평속도가 남아 있어야 한다고 하였는데, 본 연구에서는 1.26 m/s 남았다.

Angulo-Kinzler 등(1994)은 장대를 곧게 펴는 순간(PS) 수직

속도가 클수록 인체중심이 최대인 순간(PH)의 속도도 크며, 따라서 PS 순간의 수직속도는 경기력의 주요요소로 간주된다고 하였다. 본 연구에서도 최대 수직속도가 PS 순간에 나타남으로써 이러한 경향을 보였다. 인체중심의 수직속도 차이는 바로 수직 상승높이 차이를 의미하기 때문이다. Angulo-Kinzler 등(1994)은 바르셀로나올림픽 1위와 7위의 기록은 5.91 m, 5.74 m 이었으며, 장대를 놓는 순간의 수직속도는 1.81과 1.12 m/s로서 이는 수직상승높이 11 cm를 의미하는 것이라고 하였으며, 그립의 위치 외에도 수직속도가 경기력에 직접적인 영향을 주는 것이라 하였다. 본 연구에서는 3위를 차지한 Lavillenie(5.80 m 기록)가 1.03 m/s로 가장 많았지만, 바르셀로나올림픽 분석 선수에 비해 수직속도가 낮았다. 하지만 Lavillenie 선수는 이벤트 3에서 가장 많이 장대를 구부렸으며(83°), 이벤트 4에서 가장 큰 수직 상승속도(5.2 m/s)를 보임으로써 많은 잠재력을 보여준 것으로 간주되었다. 그는 그만큼 장대에 많은 탄성에너지를 비축할 수 있고, 이를 활용하여 가장 빠르게 바를 향해 도약하는 것으로 평가할 수 있었다. 하지만, 높은 수직속도와 많은 장대 굴곡에 비해 경기기록이 낮은 것은 에너지 활용 측면에서 효율이 낮거나 본인의 잠재력을 기록으로 연결시키지 못하는 기술적 결함을 의미하는 것으로 사료되어 정밀 분석을 통한 개선이 필요한 것으로 사료되었다.

장대가 펴지는 동안 인체중심 높이는 줄곧 높아지고, 장대를 놓은 후에도 인체중심은 약 0.31 m 상승하였다. 특히 3 위를 차지한 Lavillenie 선수가 가장 높은(6.16 m) 인체중심의 위치를 가지고 있어 향후 기술적인 면을 보완한다면 보다 향상된 기록을 수립할 수 있을 것으로 예상할 수 있었다. 이처럼 높은 값을 보인 것은 릴리즈 직전까지 장대에 힘을 가하여 장대의 탄성에너지를 활용하려는 능동적인 수행(Arampatzis 등,2004)으로 평가할 수 있기 때문이었다.

V. 요약 및 제언

본 연구는 2011 대구세계육상선수권대회 남자 장대높이뛰기 결선경기를 운동학적으로 분석하였다.

2011 대구세계육상선수권대회의 경기기록은 2009 베를린대회에 비해 평균 6 ㎝ 향상되었다. 그리고 조주 속도와 도약 지점의 거리가 평균적으로 증가하였다. 조주속도의 증가는 장대높이뛰기 기록에 영향을 미치는 초기 요인의 향상을 의미하며, 도약지점의 증가는 그립을 높이 잡은 것을 의미한다. 이 요소는 체력과 밀접한 관계가 있기 때문에 경기력 향상을 위한 노력의 징표로 해석된다.

최종 1 - 2 스텝 사이의 수평속도가 1990년대의 2 m/s보다 현저히 줄어들었다. 이러한 조주구간의 감속은 기술적 변화 경향을 보인 것이라 할 수 있다.

장대 구부리기 및 펴기 단계에서 장대를 놓는 시점과 인체중심의 최대 높이를 비교해 보면 인체중심의 높이가 31 ㎝나 높고, 특히 3 위를 차지한 Lavillenie 선수는 가장 높은(6.16 m) 인체중심을 보여 향후 기술적 보완을 통하여 보다 향상된 기록을 수립할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

이러한 연구는 한국 남자 장대높이뛰기 선수뿐만 아니라 세계 장대높이뛰기 선수의 기록 향상을 위한 핵심 변인의 탐색의 중요한 의미를 부여할 수 있는 것으로 사료된다. 또한 남자 장대높이뛰기 기록이 저조한 우리나라 선수의 경기력 향상을 위한 훈련 방안의 과학적인 기반 구축에 기여할 것으로 기대된다. 이에 향후에도 이와 같은 연구가 지속적으로 이루어지기를 바라며, 특히 장대높이뛰기 경기력 핵심 요인에 대한 체계적인 연구를 통하여 기술적 메커니즘을 규명하는 연구가 이어지기를 제언한다.

참고문헌

Angulo-Kinzler, Kinzler, Balius, Turro, Caubet, Escoda & Prat (1994). Biomechanical analysis of the pole vault event. *Journal of Applied Biomechanics*. 10, 147~165.

Angulo-Kinzler, R. M., Kinzler, S. B., Balius, X., Turro, C., Caubet, J. M., Escoda, J., et al.(1994). Biomechanical analysis of the pole vault event. *Journal of Applied Biomechanics*, 10, 147-165.

Arampatzis, A., & Brüggemann, G. P.(1999). mechanical-energetic processes during the giant swing exercise before dismounts and flight elements on the high bar and the uneven parallel bars. *Journal of Biomechanics*, 32, 811-820.

Arampatzis, A., Schade, F., and Brüggemann, G. P.(2004). Effect of the pole-human body interaction on pole vaulting performance. *Journal of Biomechanics*, 37, 1353-1360.

Choi, K. J.(2011 a). The sport scientific support for analyzing of pole vault skills for 2011 national athletic team. Unpublished requisitioned research report, *Korea Institute of Sport Science*.

Choi, K. J.(2011 b). The skills of pole vault and sport science . *Sport science* No. 115. pp. 26~33.

Durey, A.(1997). Chapter 12: The pole vault. In a. Durey(Ed.), *Physics for sports science [in French]*. (pp. 194-205).

Paris: Masson.

Frère, J. et al,(2010), Mechanics of pole vaulting:a review, *Sports Biomechabnics*. 9(2), 123-138.

Gros, H. J., & Kunkel, V.(1990). Biomechanical analysis of the pole vault. In G.-P. Bruggemann, and B. Glad(Eds.), *Scientific Research Project at the Games of the 24th Olympiad - Seoul 1988, Final report* (pp.219-260). Monaco: International Amateir Athletics Federation.

Kim, T. Y.(2010). The sport scientific support for analyzing of women pole vault skills. Unpublished requisitioned research report, *Korea Institute of Sport Science*.

Kwon, Y. H.(2002). *KWON3D 3.1 motion analysis software package manual*. Visol, Korea.

Linthorne, N. P.(2000). Energy loss in the pole vault take-off and the advantage of the flexible pole. *Sports Engineering*, 3, 205-218.

Linthorne, N. P., Guzman, M. S., & Bridgett, L. A.(2005). Take-off angle in the long jump. *Journal of Sports Science*, 23, 703-712.

McGinnis, P. M.(1987). Performance limiting factors in the pole vault. *Medicine & Science in sports & Exercise*, 19, S18.

McGinnis, P. M.(2004). Evolution of the relationship between performance and approach run velocity in the women's pole vault. In M. Lamontagne , D. G. E. Roberson and H. Sveistrup (Eds.), *Proceedings of the 22th international Symposium on biomechanic on sports* (pp. 531-534). Ottawa, ON: international Society of Biomechanics in sports.

Michiyoshi Ae(2007). *Japan Biomechanics Research Project in IAFF World Championships in Athletics*, Osaka 2007.

Morlier, J.(1999). *Three dimensional dynamic study of pole vaulting: characterizing and modeling a vaulting pole[in french]*. Unpublished Ph D. thesis, University of Bordeaux I, Bordeaux.

Petrov, V.(2004). *Pole Vault-the state of the art, Facts and vision symposium at the German Sports Univeristy in Cologne* , 12-14 March.

Petrov, V.(2008). *The five Phases of pole vault performance, 3rd European pole vault conference - On the road to Beijing*. German sport University cologne (DE): European Athletes.

Schade, F.(2006). Biomechanics of the pole vault: selected asfacts 2nd European pole vault conference: Peaking Performance. German Sport University Cologne (DE): *European Athletics*.

Schade, F., Arampatzis, A., & Brüggemann, G. P.(2004). A new way of looking at the biomechanics of the pole vault. *New Studies in Athletics*, 19, 33-42.

Schade, F., Arampatzis, A., & Brüggemann, G. P.(2006). Reproducibility of energy parameter in the pole vault. *Journal of Biomechanics*, 39, 1464-1471.

Schade, F., Arampatzis, A., & Brüggemann, G. P.(2000). Influence of different approaches for calculating the athlete's mechanical energy on energetic parameters in the pole vault. *Journal of Biomechanics*, 33, 1263-1268.

Ryoo, D. S.(2003). *Kinematic analyses of the pole vault event*. Unpublished doctorial, Su-won University.