2011 대구 세계육상선수권대회 여자 장대높이뛰기경기 기술의 운동학적 분석

최규정¹ · 이경옥² · 김남희² · 강지은² · 김혜림²

¹국민체육진흥공단 체육과학연구원 스포츠과학산업연구실 · ²이화여자대학교 건강과학대학 체육과학과

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

Kyoo-Jeong Choi¹ · Kyung-Ok Yi² · Nam-Hee Kim² · Ji-Eun Kang² · Hye-Lim Kim²

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 women'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, ratio of step length to height, average velocity at the final 5~10 m, approach position. Three variables were analyzed during plant: pole angle, center of gravity (COG) velocity, and COG takeoff angle. 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 increased, while run up velocity and approach position were almost unchanged. However, horizontal velocity during the last two steps of the final approach decreased noticeably compared to speeds from 1990. These results reflect the change in both technique and physical fitness in pole vaulters. During extension, the peak height of COG surpassed the clearance height by an average of 0.11m. These specific results can help coaches and athletes modify training and improve performance.

Keywords: Women's pole vaulting, Run-up analysis, Plant, Swing-up

I. 서 론

대구광역시가 2011 세계육상선수권대회 개최지로 선정되면서 우리나라는 3대 국제 스포츠 이벤트를 모두 유치한 국가 대열에 들었다. 대회 유치가 갖는 의미 가운데 가장 큰 것은 스포츠 강국으로서의 위상과 자긍심 고취이지만, 반면에 우리나라

육상 경기력의 전반적 부진 때문에 대회의 비중에 상응하는 성공적 개최로 평가될 것인지에 대한 걱정도 적지 않았다. 국제대회 개최의 성공여부는 일반적으로 대회의 조직, 경기시설, 대회운영, 숙박, 교통, 통신 등 여러 측면을 고려하여 평가되지만, 무엇보다 중요한 것은 경기장에 나타난 개최국민의 호응도이기 때문에 우리나라 국민의 육상에 대한 성원이 미약한 점을 고려할 때, 성공적 개최 전망이 불투명했던 것이다.

하지만 이들은 모두 외형적 요소들이고, 국제대회 유치의 내면적 목적은 해당 종목의 경기력 향상을 도모하는 계기로 삼고자 함이다. 이러한 관점에서 세계육상선수권대회의 세부종목별 경기내용을 분석하는 것은 세계적인 선수들의 기술에 대한 고

Corresponding Author: Kyoo-Jeong Choi
Korea Institute of 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.

급정보를 수집하는 효과가 있고, 이를 훈련에 활용하여 경기력 향상을 도모할 수 있으며, 나아가 우리나라 스포츠과학 수준을 널리 전 세계에 알리는 계기가 되므로 그 필요성이 매우 높은 것으로 사료된다.

우리나라 육상 경기력은 전반적으로 낮은 수준이며, 그로 인해 육상에 대한 국민의 관심도 개선되지 않는 실정이다. 학문적 관심도 낮아 장대높이뛰기는 2000년 들어 Ryoo(2003), Kim(2010) 등의 연구를 제외하면 찾아보기 힘든 실정이다. 육상 경기는 올림픽대회에서 가장 많은 메달이 걸려 있으며, 다른 종목의 기초가 되므로 육상의 발전 없이는 스포츠 선진국으로 진입하기 어렵다고 해도 과언이 아닐 것이다. 장대높이뛰기 종목도 예외는 아니어서 우리나라 기록(남자 5.63 m, 여자 4.40 m)이 세계기록(남자 6.14 m, 여자 5.06 m)과 50 cm 이상 격차를 보이고 있다. 2011년 우리나라 육상선수권대회에서 최윤희 선수가 4.40 m 신기록을 수립하였지만, 이는 겨우 올림픽 출전권을 획득한 기준기록 수준이다(Choi, 2011 a). 그러므로 이러한 부진을 타개하기 위해 세계대회를 유치한 입장에서 세계적인 선수와 기술적으로 차이를 보이는 요인을 과학적으로 규명하는 것이 필요하며, 이러한 관점에서 전 세계의 우수선수들이 자신의 최고 기량을 발휘하는 대구세계육상선수권대회는 놓칠 수 없는 경기로서 장대높이뛰기 경기내용에 대한 영상분석은 그 필요성이 매우 높다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 여자 장대높이뛰기 결선에 오른 선수를 대상으로 실제 경기 장면의 영상 자료를 기록, 수집하고 운동학적 분석을 실시하여 여자 장대높이뛰기 기록에 영향을 미치는 운동학적 변인을 추출하는데 있다. 이러한 결과는 우리나라 여자 장대높이뛰기 선수의 경기력 향상을 위한 훈련 자료로 유용할 것이며, 나아가 2011 대구세계육상선수권대회의 성공적 개최에 기여할 것이다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구는 2011 대구 세계육상선수권대회의 여자 장대높이뛰기경기 결선에 진출한 12 명 중, 상위 8 명의 선수를 대상으로 하였으며, 여러 시기 가운데 가장 높은 기록에 도전하여 성공한 것을 분석하였다. 연구대상 8 명의 평균연령은 27.9 세로 2008년 베이징올림픽대회(26.7 세)와 2009년 베를린 세계육상선수권대회(26.3 세) 때보다 약 1 - 2 세 많았다. 본 연구대상의 신체적 특성은 <Table 1>과 같았다.

Table 1. Characteristics of subjects

Athlete	Rank	height (m)	Age (year)	Record (m)
Murer F. (BRA)	1	1.72	30	4.85
Sturutz M. (GER)	2	1.60	30	4.80
Feofanova S. (RUS)	3	1.63	31	4.75
Suhr J. (USA)	4	1.83	29	4.70
Silva Y. (CUB)	5	1.61	24	4.70
Isinvaeva E. (RUS)	6	1.74	29	4.65
Ptácnikova J. (CZE)	7	1.74	25	4.65
Kiriakopoulou N. (GRE)	8	1.67	25	4.65
Mean ± SD		1.69 ± 0.08	27.9 ± 2.75	4.72 ± 0.08

2. 동작 구분

장대높이뛰기 기술 분석은 전체 기술을 4 또는 6단계로 구분하여 (Frere 등, 2010; Petrov, 2004) 실시한다. 4 단계 구분은 조주단계, 도약단계, 장대 구부리기 단계, 장대 펴기 단계로 나누는 것으로서 가장 많이 사용되는 방법이다. 마지막 발의 착지(touch down; TD 1) 순간을 기점으로 그 이전을 1단계, 조주(run up) 단계라 한다. 마지막 발의 착지 후, 장대를 폴 박스에 짚고(pole plant; PP), 지면에서 이륙(take-off; TO 1)되는 순간까지를 2단계, 이륙 단계라 하고, 이어서 장대가 최대로 구부러지는 순간(max. pole bend; MPB)까지를 3단계, 장대 구부리기 단계라 한다. 그리고 장대를 곧게 펴고(pole straight; PS), 장대를 놓고(pole release; PR), 인체중심이 최고점(peak height; PH)에 이르며, 바를 넘는(bar clearance) 구간을 4단계, 장대 펴기 단계라 한다(Figure 1).

본 연구는 이 분류법을 근간으로 조주단계와 도약단계는 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

Figure 1. Four phases of pole vault (Frere, 2010)

3. 연구내용

분석변인은 다음과 같이 설정하였다.

- 조주 단계 : 전체 조주거리, 스텝 수, 평균 보폭 및 신장 대비 비율, 폴 박스로부터 5 - 10 m 구간의 평균 속도, 도약 위치(폴 박스 기준)
- 도약 단계 : 장대 꽂기 각도, 인체중심의 이동 속도, 인체중심의 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 여자 장대높이뛰기 경기에 참가한 모든 선수(33 명)의 예선, 결선 경기를 5 대의 비디오카메라를 사용하여 촬영하였다.

예선경기는 2011년 8월 28일 A, B 두 그룹으로 나뉘어 진행되었으며, 경기 당일 날씨는 맑았다. 예선 참가자 가운데 IAAF 선정(2011년 8월 기준) 톱 10 선수가 7 명 포함되었고, 모두 결선에 올랐다. 결선 진출 기준기록(qualification height)은 4.60 m로서 2008 베이징올림픽과 2009 베를린 세계육상선수권대회의 4.60 m과 같았다. 바 높이는 4.10 m에서 시작하여 4.25, 4.40, 4.50, 4.55, 4.60 m로 증가시켜 12 명이 결선에 진출하였다. 베이징올림픽에서는 4.00 m에서 시작하여 바의 높이를 4.15, 4.30, 4.40, 4.50, 4.60 m로 증가시켰으며, 베를린대회에서는 4.10, 4.25, 4.40, 4.50, 4.55 m로 증가시켜 12 명이 결승에 진출하였다. 바의 첫 높이는 베이징(4.00 m)보다 10 cm 높게, 베를린(4.10 m)과 동일하게 시작하였으며, 베이징올림픽에서는 4.50 m에서 결승진출자가 가려졌으며, 베를린대회에서는 K. Gadschiew(4.50m)를 제외하곤 4.55 m로 결승진출자가 결정되었고, 대구대회에서는 4.55 m에서 결승진출자가 가려졌다.

결선경기는 2011년 8월 30일, 한 그룹에 편성되어 A 경기장만을 사용하여 진행되었다. 결선경기에 참가한 12 선수의 경기를 모두 5 대의 비디오카메라를 사용하여 촬영하였고 이들 중 최종 8 명의 최고기록 성공 시기의 영상 자료를 분석하였다.

비디오카메라는 경기운영에 지장을 주지 않도록 관중석에 설치하였다. 비디오카메라 2 대(cam 1, 2)는 조주구간을 전·후반부로 나누어 측면에서 촬영하는데 사용하였고, 2 대(cam 3, 4)의 비디오카메라는 2 개의 경기장 A, B 전체 구간을 각각 정면에서 촬영하는데 사용하였다. 나머지 1 대(cam 5)는 선수의 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 분석하였으며, 촬영속도는 60 Hz로 하였다.

Figure 2. The layout of cam 1-5

Figure 3. The layout of control objects for DLT calibration

5. 자료 처리

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

III. 연구 결과

여자 장대높이뛰기 결선경기에 참가한 1 - 8 위 선수의 최종 성공시기에 대한 영상분석을 실시하여 그 결과를 조주 단계, 도약 단계에 대해 제시한 다음, 장대 구부리기와 퍼기 단계는 서로 연결된 과정이기 때문에 하나의 단계로 묶어 제시하였다.

먼저 경기기록은 매 대회마다 선수들의 컨디션에 따라 변화되기 때문에 대구대회에서 얻은 결과가 선수들의 최고기록(personal best; PB) 또는 2011년 최고기록(season best; PB)과 비교하여 어느 수준인지를 평가하였다. 결선에 오른 선수 중, 2명(M. Strutz와 Y. Silva)의 선수가 개인최고기록을 수립하였고, 3명(F. Murrer, S. Feofanova, J. Ptacnikova)의 선수가 시즌최고기록을 수립하였다<Table 2>.

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

Rank	SB 2011 (m)	PB (m)	Record (Daegu)	Difference (%)
1	4.71	4.85	4.85	+3.0
2	4.78	4.80	4.80	+0.4
3	4.71	4.85	4.75	+0.8
4	4.91	4.92	4.70	-4.3
5	4.66	4.75	4.70	+0.9
6	4.76	5.06	4.65	-2.3
7	4.60	4.66	4.65	+1.1
8	4.71	4.71	4.65	-1.3

1. 조주단계

장대높이뛰기 전체 조주구간의 동작을 총괄적으로 알아보기 위하여 총 조주거리, 스텝 수, 평균 보폭 및 보폭의 신장에 대한 비율을 구하였다<Table 3>.

조주를 시작하여 마지막 발을 착지한 순간까지의 총 조주거리는 평균 30.5 m이었다. 총 스텝 수의 평균은 16.3 보로 2009 베를린대회(15.9 보)보다 약간 증가하였다. 평균 보폭은 1.87 m, 그리고 신장 대비 비율은 110.8 %로 나타났다.

전체 조주구간을 전반부(마지막 12-9 보), 중반부(마지막 8-5 보), 후반부(마지막 4-1 보)로 나누어 가속을 위한 보폭의 변화 형태를 조사하였다<Table 4>. 경기에 사용하는 스텝 수가 선수마다 다르기 때문에 가속 구간을 일률적 기준(4, 8, 12 보)으로 구분하는 것이 정확하지 않지만, 조주 초반부의 스텝은 예비동작에 해당되므로 이를 제외시키면 거의 유사한 형태로 간주할 수 있다.

초반부 평균 보폭은 1.91 m(신장 대비 114.4 %)이었고, 중반

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

Rank	Height (m)	Total Distance (m)	# of Steps (step)	Average Step Length (m)	Ratio (%)
1	1.72	33.19	18	1.84	107.0
2	1.60	30.42	16(SS)*	1.79	111.9
3	1.63	29.54	16	1.85	113.5
4	1.83	32.27	18	1.79	97.8
5	1.61	28.22	14	2.02	125.5
6	1.74	31.29	16	1.96	112.6
7	1.74	29.22	16	1.83	105.2
8	1.67	30.20	16	1.89	113.2
M	1.69	30.5	16.25	1.87	110.8
± SD	± 0.08	± 1.64	± 1.28	± 1.08	± 8.00

* additional 1 short step for preparation first step

부에서는 1.94 m(신장 대비 114.9 %)로 소폭 증가하였다. 그리고 후반부에서는 1.92 m(신장 대비 113.3 %)로 약간 감소하였다. 참고로 베를린 대회에서는 5 위(4.55 m)였으나 이번 대구 대회의 우승자인 브라질 F. Murer 선수(4.85 m)의 스텝별 보폭을 제시하였다<Figure 4>.

<Table 5>는 2009 베를린 세계육상선수권대회와 2011 대구

Table 4: Average step length for the section of 12 - 9 step, 8 - 5 step and 4 - 1 step

Rank	Height	Average step length (*)		
		Last 12 - 9 step	Last 8 - 5 step	Last 4 - 1 step
1	1.72	1.89 (109.9)	1.94 (112.8)	1.95 (113.4)
2	1.60	1.87 (116.9)	1.77 (110.6)	1.75 (109.4)
3	1.63	1.91 (117.2)	1.80 (110.4)	1.93 (118.4)
4	1.83	1.91 (104.4)	1.97 (107.7)	1.91 (104.4)
5	1.61	2.07 (128.6)	2.11 (131.1)	2.01 (124.8)
6	1.74	2.08 (119.5)	2.09 (120.1)	1.94 (111.5)
7	1.74	1.82 (104.6)	1.95 (112.1)	1.91 (109.8)
8	1.67	1.91 (114.4)	1.94 (114.4)	1.92 (115.0)
M	1.69	1.93 ± 0.09	1.94 ± 0.12	1.92 ± 0.07
± SD	± 0.08	(114.4 ± 8.12)	(114.9 ± 7.49)	(113.3 ± 6.22)

(*) represents the ratio of step length to her height

Figure 4 Each step length for run-up (Murer F.)

세계육상선수권대회에서 8위에 포함된 여자 장대높이뛰기 경기의 기록, 조주 스텝 수, 조주속도(5 - 10 m 조주구간의 평균 속도), 도약 지점(폴 박스를 기준으로 마지막 착지 발까지의 거리)을 나타낸 것이다.

2011 대구 세계육상선수권대회의 평균 경기기록은 4.72 m로서 2009 베를린대회(4.58 m)보다 14 cm 증가하여 경기력이 향상되었음을 보여주었다.

조주속도는 8.23 m/s로 2009 베를린세계육상선수권대회와 같았다. McGinnis(2004)는 장대높이뛰기 여자선수가 조주속도와 기록 사이에 $r = 0.77$ 의 높은 상관관계가 있다고 하여 이런 측면에서 볼 때, 평균 조주속도의 차이가 없는 점은 다소 부정적인 것으로 해석되었다.

도약 지점 역시 베를린대회(3.62 m)와 대구대회(3.62 m)가 같았다. 그러나 2007년 슈투트가르트 대회와 비교하면, 대구 대회는 폴 박스에서 평균 0.12 m 가까워졌다. 이러한 경향은 남자가 0.22 m 정도 떨어진 것과 반대되는 결과이다. 반면 대구

Figure 5. Stick figure and photo of Murer F. (BRA)

Table 5. Jumping height, run-up velocity VA in section 10-5m, 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)
Rogowska, A. (POL)	4.75	16	8.68	3.45	Murer F. (BRA)	4.85	18	8.27	4.04
Johnson, C. (USA)	4.65	16	8.32	3.35	Sturutz M. (GER)	4.80	16(SS)***	8.23	4.10
Pyrek, M. (POL)	4.65	16	7.92	3.75	Feofanova S. (RUS)	4.75	16	8.30	3.40
Spiegelburg, S. (GER)	4.65	16	8.33	3.80	Suhr J. (USA)	4.70	18	8.30	3.54
Murer, F. (BRA)	4.55	16	8.26	3.85	Silva Y. (CUB)	4.70	14	8.15	3.69
Dennison, K. (GBR)	4.55	14	8.24	3.40	Isinvaeva E. (RUS)	4.65	16	8.27	3.46
Polnova, T. (RUS)	4.40	17	7.68	3.80	Ptacknikova J. (CZE)	4.65	16	8.20	3.39
Battke, A. (GER)	4.40	16	8.43	3.55	Kiriakopoulou N. (GRE)	4.65	16	8.13	3.35
M ± SD	4.58 ± 0.13	15.9 ± 0.83	8.23 ± 0.31	3.62 ± 0.20	M ± SD	4.72 ± 0.08	16.3 ± 1.30	8.23 ± 0.07	3.62 ± 0.30

* the velocity has analyzed in the run-up section between 10 - 5m from the cut-in box

** AP has analyzed the distance between cut-in box and the last heel strike

*** additional 1 short step for preparation first step

대회 우승자인 F. Murer(BRA)의 도약 지점(4.04 m)은 베를린 대회 때의 3.85 m에 비해 약 19 cm 늘어났다.

2 도약 단계

조주 구간의 마지막 발을 착지한 다음 장대를 폴 박스에 꼽을(PP) 때, 장대가 지면과 이루는 각(PP 각도라 명명함)을 구하였다(Table 6). PP 각도는 약 24° - 31° 범위였으며, 평균 27.8°를 보였다.

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

R	1	2	3	4	5	6	7	8	M±SD
각도	27.4	23.7	25.7	29.4	28.5	28.5	29.1	29.8	27.8± 2.1

도약 단계에서는 폴 박스에 장대를 짚는 순간 수평속도가 감소되고, 수직속도가 상승한다. 멀리뛰기처럼 마지막 스텝에서 최적의 이륙각도를 만들기 위해 수직성분을 증가시키기 때문이다.

도약 단계의 조주 속도를 산출한 다음 마지막 발의 착지(TD 1, 2)와 도약 직전(TO 1) 사이의 인체중심의 수평속도를 구하였고, 그 감소량도 함께 계산하여 제시하였다(Table 7). TD 2 - TD 1 사이에는 평균 0.41 m/s 감소하여 과거에 비해 조주구간 속도 감소량이 현저히 줄어드는 기술적 변화를 보였다. 그리고 TD 1 - TO 1 구간에서도 평균 0.66 m/s 감소하여 마지막 1 - 2 스텝에서의 속도 감소처럼 감소량이 줄어드는 경향도 함께 보였다.

도약구간에서 인체중심의 수평속도 감소와 관련하여 Gros & Kunkel(1990)와 Angulo-Kinzler 등(1994), McGinnis(1987)는 약

Table 7. The difference of velocity (m/s)

Rank	Velocity			Difference	
	TD 2 (1)	TD 1 (2)	TO 1 (3)	(1) - (2)	(2) - (3)
1	8.24	8.41	7.47	-0.17	0.94
2	8.24	8.20	7.90	0.04	0.30
3	8.21	8.39	6.91	-0.18	1.48
4	8.33	8.02	6.57	0.31	1.45
5	8.28	7.82	6.79	0.46	1.03
6	8.50	8.05	7.29	0.45	0.76
7	8.35	7.82	7.79	0.53	0.03
8	8.00	6.14	6.82	1.86	-0.68
M	8.27	7.86	7.19	0.41	0.66
± SD	± 0.14	± 0.73	± 0.49	± 0.65	± 0.74

2 m/s 감소한다고 보고하였다. 이러한 결과를 토대로 할 때 대구대회의 분석결과는 매우 적게 감소한 것임을 알 수 있었다.

도약단계에서는 조주단계와 달리 인체중심이 바를 향하면서 수직 방향으로 상승하는 성분을 갖게 된다. 본 연구에서는 인체중심 이동속도 벡터의 수직, 수평 성분을 이용하여 이륙 각도를 구하였다(Table 8). 대구대회에 참가한 여자 1 - 8 위 선수의 이륙각도는 마지막 발의 착지 시(TD 1), 약 6°에서 이륙 순간(TO 1) 약 15°로 증가하였다.

Linthorne 등(2005)은 이륙 국면에 대한 수학적 모델을 세우고 탄성이 있는 장대를 사용할 때 이륙 단계에서 이륙속도(이륙 직전 인체중심의 합성속도)가 감소하고, 동시에 이륙각도가 증가한다고 하였다. 그리고 이 모델을 통하여 에너지 손실 규모를 밝혀냈고, 체중이 많을수록, 장대가 딱딱할수록 손실이 적고, 이륙각도가 장대와 평행을 이룰수록 에너지 손실이 적다고 하였다. 또한 이륙 국면에서 최적 이륙각도 추정치는 18°라고 추정하였다. 이 값을 토대로 본 연구에서 나타난 15°는 Linthorne 등(2005)이 제시한 이상적인 각도보다 다소 적은 값을 알 수 있었다.

Table 8. The angle of take-off on COG (degree)

Rank	event 1 (TD 1)	event 2 (TO 1)
1	5.10	14.07
2	6.76	12.06
3	6.76	17.18
4	4.83	13.06
5	7.31	18.76
6	6.47	13.00
7	6.25	18.93
8	4.83	16.32
M ± SD	6.04 ± 0.98	15.42 ± 2.72

3. 장대 구부리기 및 펴기 단계

장대높이뛰기 기술의 4단계 구분에서는 장대 구부리기와 펴기를 각각의 단계로 나누어 설명하였지만, 두 구간은 장대 지지 국면과 비행 국면을 모두 포함하는 구간으로서, 이륙 후, 장대를 최대로 구부리고 펴기, 장대 릴리즈, 인체중심 최고 위치(PH) 등의 과정을 지나는 동안 역학적 에너지 변환 과정이 고리처럼 연결되기 때문에 본 연구에서는 하나의 과정으로 분석하였다.

장대가 최대로 구부러지는 순간(이벤트 3) 장대의 굴곡 각도를 보면, <Table 9>에서 보는 바와 같이 약 100° 였다. 6위를 차지한 이신바예바(Isinbayeva) 선수는 95°의 값을 보임으로써

장대를 가장 많이 구부린 선수였다. 그만큼 많은 에너지를 장대에 축적한 것으로 평가할 수 있었다.

Arampatzis(2004)는 줄어든 역학적 에너지보다 많은 에너지가 장대에 전달되고, 반대로 줄어든 장대의 탄성에너지보다 많은 역학적 에너지가 선수에게 전달되는 것은 선수가 장대에 힘을 가하기 때문이라고 하였다. 다시 말하면 인체가 상승하는 동안 또는 장대를 놓는 순간 장대에 별도의 힘을 가하여 인체 상승을 더욱 효과적으로 완성하려는 기술을 구사하는 것이다. Shade 등(2006)은 에너지 변환 과정에서 이득을 보기 위해서는 장대에 근력을 효과적으로 가할 수 있는 기술을 익혀야 하고, 특히 손목이나 고관절보다 어깨 관절을 이용한 일량이 증가해야 한다고 하였다. 이를 위해서는 장대가 곧게 펴진 다음 바를 넘을 때 장대를 아래방향으로 더 밀어내는 힘을 가하는 동작을 취함으로써 가능하다. 그리고 이는 장대를 놓기 전에 장대가 다시 약간 구부러지는 것을 통하여 알 수 있는데(Choi, 2011) 본 연구를 통하여 이러한 경향을 보인 선수는 1, 4, 6위 3명이었다.

Table 9. The angle of pole bended (degree)

Rank	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
1	95.5	170.7	172.9	174.8
2	98.5	165.2	165.2	165.0
3	105.2	169.5	172.1	170.1
4	96.7	176.4	176.2	174.0
5	107.1	168.7	172.6	172.0
6	95.1	171.1	170.7	171.0
7	103.0	166.7	173.8	173.7
8	108.3	168.9	176.9	177.0
M	101.18	169.7	172.5	172.2
± SD	± 5.4	± 3.4	± 3.6	± 3.6

장대가 펴지는 동안 수평-수직속도 성분을 구하였다<Table 10 참조>. Frere(2010)에 의하면 장대가 최대로 구부러질 때까지는 수평속도가 수직속도보다 크며, 장대가 펴지는 동안에는 반대 현상을 보인다고 한다. 그리고 가장 이상적인 것은 MPB 시점에 수평-수직 속도가 일치하며, MPB 전에는 선수가 전방으로 이동하면서 장대를 휘게 해야 하며, MPB 후에는 수직으로 이동해야 한다고 하였다.

본 연구에서는 2 위(Didenkow 선수)를 제외한 선수 모두 장대가 최대로 구부러진 시점(이벤트 3)에서 수평속도가 수직속도보다 높은 값을 보였으며, 수직속도와 수평속도의 차이는 평균 1.44 m/s였다. 수평속도와 수직속도가 가장 근사하게 같은 값을 보인 선수도 역시 2 위 선수로 나타났다. 그리고 수직속도

와 수평속도 사이에 가장 많은 차이를 보인 선수는 4 위를 차지한 선수로서 1.27 m/s로 나타났다.

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

Rank	Event 3		Event 4		Event 5		Event 6	
	H	V	H	V	H	V	H	V
1	2.61	1.74	1.38	3.72	1.01	0.21	1.04	1.02
2	2.50	2.52	1.54	4.38	1.59	1.54	1.32	0.11
3	2.60	2.31	1.53	3.47	1.19	0.40	1.23	-0.26
4	2.95	1.68	1.45	3.08	1.23	0.47	1.25	0.34
5	2.74	2.53	1.53	3.83	1.16	0.82	1.30	0.24
6	2.76	2.20	1.87	3.86	1.63	0.99	1.62	0.05
7	2.36	2.19	1.19	3.12	1.41	0.18	1.39	0.29
8	2.49	2.35	1.26	3.52	1.24	0.18	1.20	0.34
M	2.63	2.19	1.47	3.62	1.31	0.60	1.29	0.27
± SD	± 0.19	± 0.32	± 0.21	± 0.42	± 0.22	± 0.48	± 0.17	± 0.36

H : Horizontal Velocity, V : Vertical Velocity

장대가 펴지는 동안에는 수평속도가 줄어들었고, 장대를 놓고 바를 넘기 위해 인체중심의 위치가 최대인 시점(이벤트 6)에서는 평균 1.29 m/s의 수평속도가 남아 있었다. 이는 남자선수들이 1.26 m/s 남았던 것과 거의 유사한 결과였다. MPB 이후 상위 3 명의 선수와 6 위 Isinvayeva 선수의 수평속도 변화 형태를 <Figure 6>에 제시하였다.

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

수직속도는 장대가 펴지는 순간(이벤트 4)에 가장 높았고, 본 연구에서는 2 위를 차지한 선수가 4.38 m/s로 수직속도가 가장 높았다. 그리고 Isinvayeva 선수가 3.86 m/s로 다음으로 높았으며, 전체적으로는 평균 3.62 m/s로 나타났다. 이후 장대를 놓

고, 바를 넘는 시점에서는 수직속도가 0.60, 0.27 m/s로 줄어들었다.

8 명 가운데 인체중심이 가장 높았던 사람은 6 위를 차지한 Isinvayeva 선수(4.99 m)였고, 1 위 Murer 선수는 4.98 m을 보였다. Isinvayeva 선수는 장대를 가장 많이 구부림으로써 장대에 많은 탄성에너지를 비축하였고, 이를 수직 위치에너지로 변화시킨 결과로 해석되었다. 상위 3 명과 Isinvayeva 선수의 MPB 이후 수직속도 변화 형태를 <Figure 7>에 제시하였다.

Figure 7. The vertical velocity of COG after MPB for 1, 2, 3, 6 rankers

남자 결선에서 Lavillenie 선수가 가장 많이 장대를 구부렸고, 인체 중심고도 가장 높았으나 3 위에 그치는 결과를 보여준 것과 같이 Isinvayeva 선수도 대구대회에서 좋은 결과를 얻지 못했다. 높은 수직속도와 장대의 굴곡 각도에 비해 경기기록이 낮은 것은 에너지 활용 측면에서 비효율성을 의미하는 것으로 사료되며, 또한 바를 넘는 기술의 정밀 분석을 통한 개선이 필요한 것으로 사료되었다.

인체중심의 높이는 <Table 11>에서 보는 바와 같이 구부러진 장대가 펴지는 동안 줄곧 높아지는 형태를 보였다. 장대를 놓는 시점과 중심고가 가장 높은 시점 사이에도 인체중심은 평균 5 cm 상승하였지만, 남자선수들의 평균(31 cm)에 비해서는 매우 낮았다. 이는 남자 선수보다 여자 선수들이 첫째, 바를 내리누르는 파워가 부족하고 둘째, 그 파워를 이용하여 인체중심을 높이는 기술도 부족하며, 셋째, 높은 인체중심을 활용하여 바를 넘는 기술도 부족하다는 것을 의미한다. 그러나 Isinvayeva 선수를 보면 최대 인체중심의 높이와 기록 간에 0.34m의 차이를 보이고 있다. 이것은 남자 평균(0.31m)보다 높으며, 남자경기의 3 위를 차지한 Lavillenie 선수의 0.36m와 거의 유사한 것으로 Isinvayeva 선수의 높은 잠재력을 나타낸 좋은 결과로 평가되었다.

Table 11. The height of COG

(m)				
Rank	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
1	2.15	4.07	4.93	4.98
2	2.06	3.73	4.77	4.89
3	2.24	3.85	4.71	4.72
4	1.93	4.05	4.75	4.79
5	2.23	3.91	4.78	4.83
6	2.10	3.96	4.92	4.99
7	2.30	4.00	4.63	4.64
8	2.11	3.78	4.68	4.68
M± SD	2.14±0.12	3.92±0.12	4.77±0.11	4.82±0.13

Table 12. The height of COG at event 6 (peak height) & their records in Daegu

(m)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
PH	4.98	4.89	4.72	4.79	4.83	4.99	4.64	4.68
Reco rd	4.85	4.80	4.75	4.70	4.70	4.65	4.65	4.65
								4.72±0.08

IV. 논의

2011 대구 세계육상선수권대회 여자 장대높이뛰기 경기 분석결과를 2008 베이징올림픽대회, 2009 베를린 세계육상선수권대회 및 다른 선행연구 결과와 비교, 고찰하였다.

조주단계의 총 스텝 수는 평균 16.3 보로 2009 베를린대회 때의 15.9 보보다 증가하였다. 그리고 평균 보폭은 1.87 m, 신장 대비 비율은 110.8 %로 나타났다. 또한 보폭을 초, 중, 후반부로 나누어 볼 때 초반부는 1.93 m(신장 대비 114.4 %), 중반부는 1.94 m(신장 대비 114.9 %), 후반부는 1.92 m(신장 대비 113.3 %)로 나타났지만, 베를린대회 결과보고서에는 이에 대한 값이 없어 비교할 수 없었다.

장대높이뛰기 경기는 조주를 통해 얻은 운동에너지가 장대를 폴 박스에 꼽고 도약하면서 장대에 탄성에너지로 변환되었다가 다시 수직 방향의 위치에너지로 변환되는 대표적인 에너지 변환운동이기 때문에 조주에 의한 운동에너지를 경기력의 기본으로 간주할 수 있다(Choi, 2011 a). 하지만 대구대회에서 나타난 조주속도는 8.23 m/s로 2009 베를린대회(8.23 m/s)와 차이를 보이지 않았다. 이런 관점에서 비록 경기기록이 향상(14 cm)되었다 하더라도 이것은 체력 요인의 향상에 의한 것으로 간주하기 어렵다는 점을 보여준 것으로 해석되었다. 그리고 McGinnis(2004)는 여자선수들의 인체중심 수평속도와 기록 사

이의 상관관계는 $r = 0.77$ 의 비교적 높은 상관관계가 있다고 하였기 때문에 역시 이러한 측면에서 조속도의 차이가 없는 점은 다소 부정적인 것으로 간주되었다. 이 외에도 도약지점이 베를린대회와 비교하여 전혀 차이를 보이지 않았다는 점(3.62 m로 동일하였음)은 바람직하지 못한 결과로 사료되었다.

Linthorne(2000), Arampatzis 등(1999, 2004)은 도약 단계에서는 운동에너지 감소를 볼 수 있다고 하였으며, 이는 주로 조속도의 감소에 의한 것이라 하였다. 그리고 도약단계에서 인체중심의 수평속도 감소와 관련하여 Gros & Kunkel(1990)는 서울올림픽 금메달리스트(5.90 m 기록)를 대상으로 마지막 1 - 2 스텝의 감속이 약 2 m/s라고 하였다. Angulo-Kinzler 등(1994)은 바르셀로나올림픽 금메달리스트(5.80 m 기록)를 대상으로 감속이 약 2 m/s라고 하였으며, McGinnis(1987)도 16 명의 선수(5.50 - 5.81 m 기록)를 대상으로 측정한 결과 수평속도가 약 2 m/s 감소한다고 보고하였다. 물론 분석구간이 다르다 하더라도 선행연구와 비교해볼 때 대구대회에서 나타난 수평속도의 감소량이 줄어든 것은 조속도를 높이려는 긍정적인 기술 변화로 해석되었다.

이륙단계에서 인체중심이 수직으로 상승하는 성분을 분석한 결과 약 15°로 나타났다. 이는 Linthorne 등(2005)이 이륙 국면에 대한 연구에서 제시한 이륙 국면의 최적 이륙각도 추정치(18°)보다는 다소 적은 값이었다. Durey(1997)와 Morlier(1999)는 이륙 각도가 조속의 수평 성분의 손실을 줄이기 위해 전방으로 향하기 때문에 발생하고, 장대가 구부러지기 시작하면서 선수의 이동속도는 현저히 줄어드는 것이라고 하였다.

장대 구부리기 및 펴기 단계에서는 단순히 에너지 변환만 이루어지는 것이 아니다. 장대가 휘면서 운동에너지가 탄성에너지로 변환되며, 이때 장대 굴곡각도는 비축된 에너지의 간접적인 척도로 간주된다. 장대 굴곡각도는 평균 약 100°를 보였으며, 6 위를 차지한 Isinbayeva 선수가 가장 많이 장대를 구부려(95°) 그만큼 많은 에너지를 장대에 축적한 것으로 평가되었지만, 그녀는 대구대회에서 불운하게 좋은 경기기록을 얻지는 못했다. Shade(2006), Shade 등(2000, 2006)은 최대 경기기록이 인체중심이 가장 높은 순간 최대 역학적 에너지와 매우 유의한 상관관계(여자 $r = 0.86$)가 있다고 하였다. 이는 에너지 변환의 중요함을 의미하며, Arampatzis(2004)는 이러한 에너지 변환 외에 줄어든 역학적 에너지보다 많은 에너지가 장대에 전달되고, 반대로 줄어든 장대의 탄성에너지보다 많은 역학적 에너지가 선수에게 전달되는 것은 선수가 장대에 힘을 가하기 때문이라고 하였다. 그리고 Shade 등(2006)과 Choi(2011 b)의 연구처럼 에너지 변환 과정에서 이득을 보기 위해서는 장대에 힘을 발휘하여 장대를 다시 구부리는 형태의 기술을 구사해야 하는데, 본 연구에서는 1, 4, 6 위 3 명에게 나타났으며, 비교적 경기력이 높은 선수에게서 볼 수 있는 것으로 평가되었다.

장대가 펴지는 동안의 수평-수직속도 성분에 대해 Frere(2010)는 장대가 최대로 구부러질 때까지는 수평속도가 수직속도보다 크며, 장대가 펴지는 동안에는 수직 속도가 수평 속도보다 커야한다고 하였다. 본 연구에서는 7 명의 선수(2 위 제외)가 이러한 경향을 보였다. 이러한 결과는 남자 장대높이뛰기 결선에서도 똑같이 발견되었다. 한 명의 선수가 MPB 시점에 수직속도가 수평속도보다 높았고, 수평성분과 수직성분의 속도가 유사하였던 것이다. 이는 조속도를 이용하는 기술적 특성과 관련이 있는 것으로 사료되며, 주로 도약이 빠르게 일어나는 선수에게서 발견할 수 있는 것으로 평가되었다. 이러한 기술적 경향에 대한 연구가 후속적으로 이어지기를 기대한다.

Petrov(2008)에 의하면, 수평속도 성분은 바를 넘는 동안에도 약 1.5 - 2 m/s 남아있으며, 이것은 바를 넘는데 이용된다고 한다. 만일 이것이 없으면 바를 넘지 못하고 바 앞에서 떨어지고 말 것이다. 본 연구에서는 여자 선수들의 수평속도 성분이 1.29 m/s 남아 있어 남자의 경우(1.26)와 유사하였다.

Angulo-Kinzler 등(1994)은 장대를 곧게 펴는 순간(PS) 수직속도가 클수록 인체중심이 최대인 순간(PH)의 속도도 크며, 따라서 PS 순간의 수직속도는 주요 경기력 요소로 간주된다고 하였다. 인체중심의 수직속도 차이는 수직 상승의 높이 차이를 의미하기 때문이다. 본 연구에서도 최대 수직속도가 PS 순간에 나타남으로써 그들의 연구결과와 유사한 경향을 보였다.

Angulo-Kinzler 등(1994)은 바르셀로나올림픽대회에 참가한 두 남자 선수(1, 7 위)를 대상으로 장대를 놓는 순간 수직속도(각각 1.81, 1.12 m/s)를 수직상승높이와 관련지어 연구한 보고서에서 그림의 위치 외에도 수직속도가 경기력에 직접적인 영향을 주는 것이라 하였다. 본 연구에서는 장대를 놓는 순간 수직속도가 평균 0.60m/s였고, 2 위와 6 위 선수가 1.54, 0.99 m/s로 높았다. Isinbayeva 선수(4.65 m 경기기록)는 인체중심 높이가 4.99 m로 가장 높았고, 경기기록과 무려 34 cm의 많은 격차를 보였다. 그리고 탄성에너지 비축으로 간주되는 이벤트 3에서 가장 많이 장대를 구부려(95°) 경기력의 잠재력을 보여주었고, 수직상승속도도 두 번째로 빨랐지만, 좋은 기술적 요인을 경기결과로 이어가지는 못했다. 이는 에너지 변환 기술 또는 에너지 활용의 효율성이 낮았던 점을 의미하며, 그 원인이 무엇인지 알 수 없지만, 이에 대한 정확한 분석을 통하여 개선해 나가야 하는 것으로 사료되었다.

V. 요약 및 제언

본 연구는 2011 대구세계육상선수권대회 여자 장대높이뛰기 결선경기를 운동학적으로 분석한 것이다.

2011 대구 세계육상선수권대회의 경기기록은 2008 베이징 올림픽보다 2 cm 줄었지만, 2009 베를린대회에 비해 평균 14 cm 향상되었다. 조주 속도와 도약 지점은 두 대회와 거의 같은 값을 보인다.

최종 1 - 2 스텝 사이의 수평속도는 남자선수와 같이 1990 년대의 2 m/s보다 현저히 줄어들어 조주구간의 감속이 줄어드는 기술적 변화 경향을 보인다.

장대 구부리기 및 펴기 단계에서는 장대를 놓는 시점과 중심고가 가장 높은 시점 사이에도 인체중심이 평균 5 cm 상승하였지만, 남자선수들(평균 31 cm)에 비해 낮다. 그러나 Isinbayeva 선수는 최대 인체중심의 높이와 기록 간에 34 cm의 차이를 보이고 있다. 이것은 남자 평균보다 높으며, 대구대회에 참가한 남자 Lavillenie 선수(남자 3 위)의 0.36 m과 유사한 것으로 Isinbayeva 선수의 잠재력을 나타낸 좋은 결과라고 할 수 있다.

일반적으로 초기 운동에너지와 위치에너지 비율을 통하여 능동적, 수동적 선수로 구분하며, 능동적 선수가 수동적 선수에 비해 기록도 좋고, 효율적인 동작을 수행한다고 한다(Arampatzis 등, 2004). 또한 록 백(rock back) 동작의 각운동량도 중요한 경기력 변인이며, 이것은 MPB 이전에 최대치를 보인다. 이는 장대에 힘을 가하여 좀 더 많이 구부리는 효과가 있어 탄성에너지를 그만큼 증가시킨 결과라고 할 수 있다. 따라서 장대높이뛰기 공중구면의 동작에 대한 분석과 에너지를 연계하여 분석하는 것이 필요하다. 또한 수직 상승속도를 충분히 활용하지 못하면 경기 결과는 전혀 다르기 때문에 Isinbayeva 선수는 이에 대한 정밀 분석을 통하여 경기력을 점진하는 과정이 필요한 것으로 사료된다. 아울러 이와 같은 장대높이뛰기 기술에 대한 연구는 경기기술의 변화 형태 등에 관한 정보를 얻을 수 있고, 기록 갱신을 위한 최대 공약수적인 변인을 추출해 낼 수 있다는 점에서 향후 지속적인 분석을 제안하는 바이다.

참고문헌

- Angulo-Kinzler, Kinzler, Balias, 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., Balias, 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., and 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., & 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. 26-33.
- Durey, A.(1997). Chapter 12: The pole vault. In a. Durey(Ed.), *Physics for sports science [in French]*. (194-205). Paris: Masson.
- Frere J. et al.(2010), Mechanics of pole vaulting:a review, *Sports Biomechanics*, 9(2), 123-138.
- Gros, H. J., & Kunkel, V.(1990). Biomechanical analysis of the pole vault. In G.-P. Brüggemann, and B. Glad(Eds.), *Scientific Research Project at the Games of the 24th Olympiad - Seoul 1988*, Final report (219-260). Monaco: International Amateur 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*.
- 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 IAAF 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.
- Schade, F.(2006). Biomechanics of the pole vault: selected asfacts 2nd European pole vault conference: Peaking Performance. German Sport University Cologne (DE): *European Athletics*.
- Ryoo, D. S.(2003). *Kinematic analyses of the pole vault event*. Unpublished doctoral, Su-won University.