2011 대구세계육상선수권대회 남자 높이뛰기 메달리스트들의 바이오메카닉스적 특성 분석

김의환¹ · 배영상² · 김성섭³ · 권문석³ · 위용량³ · 김기만⁴ · 이정민⁵

¹용인대학교 무도대학 유도학과 · ²계명대학교 체육대학 태권도 학과 · ³용인대학교 스포츠·웰니스연구센터 ·

⁴대구산업정보대학 생활체육레저과 · ⁵계명대학교 대학원 체육학과

Biomechanical Analysis of Men's High Jump Medalists in IAAF World Championships, Daegu 2011

Eui-Hwan Kim¹ · Young-Sang Bae² · Sung-sup Kim³ · Moon-Seok Kwon³ · Ung-Ryang Wi³ · Ki-Man Kim⁴ · Jeong-Min Lee⁵

¹Department of Judo, College of Martial Art, Yongin University, Yongin, Korea

²Taekwondo, Physical Education, Keimyung University, Daegu, Korea

³Sports & Wellness Research Center, Yongin University, Yongin, Korea

⁴Department of Sports & Leisure, Daegu Polytechnic College University, Daegu, Korea

⁵Department of Physical Education, Keimyung University, Daegu, 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 a kinematic analysis of the high jump techniques of the three men's medalists at the 2011 IAAF Championships in Daegu (August 27-September 4, 2011). In particular, a three-dimensional coordinates method was used to analyze the last three strides before touchdown, the touchdown techniques, and the movements after takeoff toward the bar. An analysis of the data for the biomechanical characteristics of the world's best high jumpers could contribute to an improvement in the performance of a national high jumper. The first conclusion of the data analysis was that the arm movements of the gold medalist, J. Williams, had a single arm form, whereas the arm movements of the other medalists were a double arm form. Second, the difference in the knee joint angles upon touchdown and toe-off was 10°. Third, J. Williams achieved his maximum CM height after takeoff (1.26 m) using the maximum flexion of his knee joint. Fourth, the foot contact duration of A. Dmitrik (0.11 s) was the shortest among the medalists, and the ratio for his transformation of horizontal velocity to vertical velocity was the greatest (75.25%) among the three. Last, the maximum CM height of T. Barry was the greatest, and his foot contact duration was the longest.

Keywords : IAAF, Kinematic, Arm's movement, Take-off, Horizontal & vertical velocity of CG, Knee joint angle, Body position.

I. 서 론

2011년 세계육상선수권대회의 대구 유치는 한국 정부, 대구 육상선수권대회조직위원회와 대한육상연맹 등의 철저한 준비와

노력의 결과이며 지금까지 총 12회의 세계육상선수권대회 중, 유럽과 북미를 제외한 아시아권 국가에서의 2번째 개최임을 감안할 때, 한국과 대구는 전 세계에 국가와 도시의 위상을 높이고 스포츠 강국으로서의 자긍심까지 가지게 되었다. 이를 더욱 성공적으로 이끌기 위해 한국운동역학회는 기존의 세계육상선수권대회에서의 운동역학 프로젝트 결과사례 등을 분석·고찰하여 효과적인 경기분석 프로젝트의 수행 방안을 마련하였으며, 수차례 예행연습 및 첨단 3D 스포츠과학장비의 활용을 통한 매스컴과의 소통을 도모하였다.

Corresponding Author: Kim, Sung Sup
Sport & Wellness Research Center, Yongin University
470 Samga-dong, Cheoin-gu, Yongin-si, Korea
Tel : +82-31-8020-2624 / Fax : +82-31-8020-3140
E-mail : kss1219@hotmail.com

본 논문은 2011 대구세계육상선수권대회 운동역학 프로젝트로서 문화체육관광부와 대한육상경기연맹으로부터 지원을 받아 수행한 것임.

2011 대구세계육상선수권대회의 스포츠과학적 지원을 위한 한국운동역학회의 프로젝트 팀은 국내 14대학과 56명의 연구원(종목별 연구수행책임자 : 20명, 연구원 : 36명) 그리고 일본의 협력팀(연구원 : 7명)으로 구성, 총 8개 종목에 대한 남·녀 경기를 분석하였으며 그 중 계명대학교와 용인대학교가 한 팀을 이뤄 높이뛰기 종목을 담당하였다.

높이뛰기는 선수개인이 자신의 도움닫기 시작위치와 주로를 선정한 후, 선수들이 주종을 이루고 있는 J자 형태의 도움닫기와 포스배리 플롭(배면뛰기)기술을 이용해 신체중심을 수평운동에서 수직운동으로 전환시킴으로서 신체중심높이를 최대한 높게하여 정해진 높이의 바(bar)를 넘는 도약경기이며 3번의 시기와 기록의 차이로 순위를 결정짓는다(Lee, 2011). 이러한 높이뛰기의 동작을 세분화시켜 보면 도움닫기(run-up), 발구름(take-off), 공중동작(bar clearance), 착지(landing)의 4단계로 나누어 볼 수 있으며 수직 상승력을 극대화하여 기록에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 요인으로는 선수들의 체격과 체력 요인 그리고 역학적 메커니즘을 바탕으로 앞서 언급한 4단계의 동작을 얼마나 순차적으로 연결시키는가하는 기술적 요인으로 나눌 수 있다(Dapena, 1980, 1988).

단계별 동작에 대한 높이뛰기 선행연구들을 살펴보면 도움닫기 마지막 3보에서 발구름 동작까지의 수평이동속도, 스트라이드 길이, 구름발 착지 시의 하지관절각도, 후경각, 발구름 지지시간 등의 기술적 측면이 경기력에 영향을 미친다고 보고하는 연구(Sung, 1991; Lee, Back & Kim, 2006)등과 효율적으로 신체접촉이 없이 바를 넘어가기 위한 발구름 후, 도약하고 신체를 비행시켜 바를 넘어가는 공중동작까지의 신체중심의 높이 변화, 수직상승속도, 신체의 장축과 좌우축을 중심으로 하는 회전 각운동량의 크기와 방향에 관한 연구(Sung, 2004)등 단계별 동작에서의 주요 변인과 신체 각 분절들의 운동역학적 변인들이 최적화된 조화를 이루어야 최상의 기술을 발휘할 수 있게 됨을 강조하였다(Ae, 1990; Bothmischel, 1990; Dapena, 1980, 1988). 이러한 기술적 측면의 중요성은 최근 높이뛰기 선수들의 체격적인 면에 의해 더욱 부각되고 있다. 세계적인 선수들이나 국내 선수들 모두 비슷한 평균 신장과 체중을 가지고 있음에도 불구하고 세계적인 선수들의 기록에 비해 국내 선수들의 경기력은 계속 저하되고 있는 실정이며 이는 위에서 말한 동작수행의 기술적인 측면이 세계적인 선수들에 비해 취약하다는 것을 대변해 주는 객관적인 근거이다. 이를 해결하기 위해 대구세계육상선수권대회 조직위원회가 2005년 대구국제육상경기대회를 기점으로 매년 대회를 개최하고 있으나 국내 높이뛰기 선수들의 기록의 향상도는 더욱 떨어지고 있는 실정이다(Lee, 2011).

그러므로 2011 대구세계육상선수권대회를 통하여 세계적인 높이뛰기 선수들의 도움닫기에서 공중동작까지의 동작을 촬영 및 동작분석을 실시, 그로부터 나온 정량적인 자료를 현장의

감독과 코치 그리고 선수들에게 경기력 향상을 위해 제공해 줄 필요가 있다. 현재 국내에는 약 10여 편의 높이뛰기 선행연구들이 진행되어 오고 있지만 세계적인 선수들의 실제경기상황을 연구하고 보고되어진 것은 Lee(2011)의 2006 대구국제육상경기대회 높이뛰기 남자 결승전에서 우승한 Stefan Holm을 대상으로 한 사례연구가 전부이며 실제 선수들에게 현장적용을 시킬 만한 기술적 측면의 자료가 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 2011. 8. 27 - 9. 4(9일간) 대구에서 실시하였던 2011대구세계육상선수권대회에서 높이뛰기 종목에 출전하였던 세계적 선수들의 발구름 전까지의 3개의 스트라이드 동작, 발구름 동작에서의 운동학적 변인 그리고 공중동작에서의 움직임 3차원으로 분석함으로써 세계적인 높이뛰기 선수들의 기술적인 측면을 조사하고 국내 높이뛰기 선수들에게는 그러한 기술적인 측면을 바탕으로 현장에서 필요한 정량적인 자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 연구 대상자

이 연구의 대상자는 남자높이뛰기 결승진출자 중 상위입상자 3명이었다<Table 1>.

2. 장비 및 연구내용

4대의 고속디지털비디오카메라(Casio, Model Ex-FH20, 촬영스피드 300 프레임, 노출시간 1/1000초)로 3명의 메달리스트를 포함한 결승 경기의 발구름 준비 마지막 2보와 발구름동작(원 발구름)을 촬영하였다. 그리고 이들 카메라는 대구스타디움의 스탠드 최상단에 설치했다<Figure 1>. 카메라의 동기는 카메라 설치위치 등의 제약이 있기 때문에 발구름 2보전 발접지 순간을 동기신호로 해서 2대의 카메라로 영상을 동기하였다. 그리고 원발로 발구름하는 동작들의 실측거리 환산을 위한 교정점의 위치는 <Figure 1,2>와 같이 설치하였으며, 오른발로 발구름하는 선수들은 반대편에 <Figure 1,2>와 같이 설치하였다. 캘리브레이션은 경기 전과 후에 각 1회씩 촬영하였다<Figure 2>. 연구내용으로는 높이뛰기시 신체중심의 속도, 도약각, 무릎관절각도, 발구름시의 신체의 기울기각 등을 분석하였다<Figure 2~5>.

3. 데이터의 처리

분석하고자 하는 상위 입상선수 3명의 최고기록 시기에 대

해 발구름전 2보 접지 시점 전의 5프레임부터 발구름하여 선수가 바(Bar)를 클리어스하는 최고점 후의 5프레임까지 신체계측점 23점을 디지털화하고, 이들의 3차원좌표값을 DLT법에 의해 산출한 다음, 이를 이동평균법을 이용하여 평활화하였다. 또한 계측오차의 왼쪽 평균은 X축(바아에 평행)방향으로 0.006m, Y축(바아 수직)방향으로 0.011m, Z축(연직)방향으로 0.007m이

며, 오른쪽 평균은 X축방향으로 0.009m, Y축방향으로 0.012m, Z축방향은 0.007m이었다. 또 Ae(1996)의 신체부분관성계수를 이용하여 신체 각 부분 및 전신의 중심위치를 추정하여, 신체 중심높이를 산출함과 동시에 수치미분함으로써 도움닫기 및 발구름 국면에 있어서의 신체부분의 속도 등을 산출하였다.

Table 1. Results of Men's High Jump, IAAF, W.C., Daegu 2011

(unit : m)

Place	Name	Country	220	225	229	232	235	237
1	Jesse Williams	USA	○	○	○	○	○	xxx
2	Aleksey Dmitrik	RUS	○	○	×○	×○	×○	xxx
3	Trevor Barry	BAH	○	○	-	○	xxx	
4	Jaroslav Baba	CZE	○	○	××○	○	xxx	
5	Ivan Ukhov	RUS	○	○	○	××○	xxx	
5	Dimitrios Chondrokoukis	GRE	○	○	○	××○	xxx	
7	Mutaz Essa Barshim	QAT	○	×○	×○	××○	xxx	
8	Aleksandr Shustov	RUS	○	×○	○	xxx		
9	Raul Spank	GER	○	○	×○	xxx		
10	Zhang Guowei	CHN	×○	○	xxx			
11	Donald Thomas	BAH	○	xxx				
12	Darvin Edwards	LCA	×○	xxx				
12	Dmytro Dem'yanyuk	UKR	×○	xxx

Figure 1. Experiment setting of Men's high jump final

Figure 2. Reference Pole Capture

Figure 4. Storomotion of High Jump

또한 높이뛰기의 높이(성적)는 발구름 발 이지시의 중심높이(H1), 공중에서 중심이 상승하는 연직거리(H2), 그리고 중심의 최고도달높이와 클리어스한 바 높이와의 차(H3)의 총합이라는 점에 착안하여 H1, H2 및 H3를 산출하였다.

- 1) H1 : 발구름 발이 지면에 닿는 순간의 신체중심높이
- 2) H2 : 공중에서 신체중심이 상승한 높이로서 본 연구에서는 발구름 발 이지시의 신체중심의 연직속도로부터 $V^2/2g$ 의 공식을 이용하여 산출($g = -9.8m/s^2$)
- 3) H3 : 신체중심의 최대치(H1+H2)와 바 높이와의 차

그리고 발구름 발 접지시의 자세의 지표로서 신체의 내경각과 후경각, 몸통의 경사각(양어깨와 양고관절의 중점을 이은 선이 연직선과 이루는 각도)을 산출하였으며, 발구름다리의 발구름시의 무릎관절각도 등을 구하였다.

Figure 3. Calibration of Men's high jump final

Figure 5. Definition of angle

III. 결 과

1. 높이뛰기 경기결과

<Table 1>은 경기결과와 성적을 나타낸 것이다. <Table 1>에 나타난바와 같이 13명이 결선에 진출하여 대부분의 선수들이 2.20 m를 통과했지만, 2.25 m에서 3명, 2.29 m에서 1명, 2.32 m에서 2명이 탈락하면서 서서히 경기결과와 윤곽이 드러나기 시작하였다. 2.35 m를 도전한 선수는 총 7명이었으나 이 중 2명의 선수만이 통과하였으며, 2.37 m을 시도한 2명의 선수는 각 3차시기까지 성공하지 못하였다.

따라서, 2011 대구세계육상선수권대회 남자 높이뛰기 결승에서는 올해 최고 기록(2.37 m)를 가지고 있는 미국의 J. Williams가 세계 챔피언 타이틀을 획득하였다. 최근 가장 좋은 기량을 보이고 있는 올해 27살의 J. Williams는 2.37m에서 첫 실패를 하기 전까지는 한 번의 실수도 없이 2.35m를 넘어

Table 2. Three Factors of High Jump's Result

Athlete	height (m)	weight (kg)	Result (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	Peak CG Height (m)	Foot Contact time(s)
Jesse Williams (USA)	1.84	75	2.35	1.38	1.26	0.29	2.64	0.14
Aleksey Dmitrik (RUS)	1.84	71	2.35	1.42	1.22	0.29	2.64	0.11
Trevor Barry (BAH)	-	-	2.32	1.44	1.22	0.34	2.66	0.19

Table 3. Velocity of CG and Angle of Take-off

Athlete	Horizontal (m/s)				Vertical(m/s)				Angle of Take -off (deg.)	Changing Rate of Velocity (%)
	Before 2step	Before 1step	Take-off		Before 2step	Before 1step	Take-off			
	on	on	on	off	on	on	on	off		
Jesse Williams (USA)	8.32	8.22	7.87	4.20	-0.97	-0.90	0.40	4.97	49.8	63.15
Aleksey Dmitrik (RUS)	8.07	7.85	6.40	4.56	-0.69	-1.14	1.88	4.88	46.9	76.25
Trevor Barry (BAH)	7.51	7.38	7.41	4.18	-1.02	-1.26	-0.57	4.88	49.4	65.86

Table 4. Knee Joint Angle at Last Stride and Take-Off Phase

(unit: deg)

Athlete	Last Stride		Take-Off Phase		
	on	off	on	max flexion	off
Jesse Williams (USA)	145.4	147.0	161.7	127.2	171.5
Aleksey Dmitrik (RUS)	146.2	142.7	174.1	155.3	176.4
Trevor Barry (BAH)	137.7	132.9	176.7	133.1	170.5

Table 5. Angles of Body Lean at Take-Off

(unit: deg)

Athlete	Backward	Inward	Trunk
Jesse Williams (USA)	37.4	29.7	36.9
Aleksey Dmitrik (RUS)	33.5	17.6	23.3
Trevor Barry (BAH)	32.8	34.8	38.3

금메달을 가져갔다. 알렉세이 A. Dmitrik은 은메달을 목에 걸
어 러시아의 자존심을 지켰다. A. Dmitrik은 J. Williams와 똑
같은 높이인 2.35 m를 성공하였으나, 2.29 m와 2.32 m, 2.35
m를 모두 2차 시기에 넘어 성공 시기에서 밀려 2위에 그쳤다.
바하마의 트레버 T. Barry는 자신의 최고 기록인 2.32 m를 성
공시키며 동메달을 획득하였다.

2. 높이뛰기 기록을 결정하는 3요인

<Table 2>에는 상위 입상선수 3명의 기록을 결정하는 3요
인의 데이터 및 기록에 대한 3요인의 비율을 나타내었다.

구름발이 지면에서 닿는 순간 신체중심의 수직높이인 H1의
높이에서 T. Barry는 1.44 m로 가장 높은 수치를 나타내었고,

A. Dmitrik은 1.42 m, J. Williams는 1.38 m 의 신체중심 수직 높이를 H1에서 나타내었다. 높이뛰기 시 구름발이 지면에 떨어지는 순간부터 공중에서 신체중심이 상승한 높이인 H2의 결과 J. Williams가 1.26 m로 가장 높게 나타내 보였고, A. Dmitrik과 T. Barry는 1.22 m로 나타났다. 그리고 최대 중심의 높이와 바의 높이와의 차이인 H3의 결과는 J. Williams와 A. Dmitrik이 0.29 m로 낮게 나타내 보였으며, T. Barry는 0.34 m의 차이를 나타내 보였다. 신체중심의 최대 높이는 낮은 기록을 넘은 T. Barry가 2.66 m로 가장 높게 나타내 보였으며, J. Williams와 A. Dmitrik은 2.64 m로 동일한 높이를 나타내 보였다. 구름발의 접촉시간은 T. Barry는 0.19초로 가장 긴 소요시간을 나타내 보였으며, J. Williams는 0.14초, A. Dmitrik은 0.11초 소요되었다.

3. 신체중심의 속도 및 도약각

<Table 3>은 발구름국면에 있어서의 신체중심의 속도변화 및 도약각을 나타낸 것이다.

신체중심의 수평속도는 J. Williams의 경우, 발구름 2보전 접지시 8.32 m/s, 발구름 1보전 접지시 8.22 m/s, 발구름 접지시 7.87 m/s, 발구름 이기지 4.20 m/s로 속도가 감소하는 경향을 나타내 보였다. A. Dmitrik의 경우도 발구름 2보전 접지시 8.07 m/s, 발구름 1보전 접지시 7.8 m/s, 발구름 접지시 6.40 m/s, 발구름 이기지 4.56 m/s로 속도가 감소하는 경향을 나타내 보였다. T. Barry의 경우는 발구름 2보전 접지시 7.51 m/s, 발구름 1보전 접지시 7.38 m/s, 발구름 접지시 7.41 m/s, 발구름 이기지 4.18 m/s로 속도는 1보전까지 감소하다가 다시 발구름 접지시 증가하였다가 발구름 이기지 다시 감소하는 경향을 나타내 보였다.

신체중심의 수직속도는 J. Williams의 경우 발구름 2보전 접지시 -0.97 m/s, 발구름 1보전 접지시 0.90 m/s, 발구름 접지시 0.40 m/s, 발구름 이기지 4.97 m/s로 속도가 아래방향으로 감소하였다가 발구름 접지시 위방향으로 전환되어 증가하는 경향을 나타내 보였다. A. Dmitrik의 경우는 발구름 2보전 접지시 -0.69 m/s, 발구름 1보전 접지시 -1.14 m/s, 발구름 접지시 1.88 m/s, 발구름 이기지 4.88 m/s로 속도가 아래방향으로 증가하였다가 발구름 접지시 위방향으로 전환되어 증가하는 경향을 나타내 보였다. T. Barry의 경우는 발구름 2보전 접지시 -1.02 m/s, 발구름 1보전 접지시 -1.26 m/s, 발구름 접지시 -0.57 m/s, 발구름 이기지 4.88 m/s로 속도가 아래방향으로 증가, 발구름 접지시 감소하였다가 발구름 이기지 위방향으로 전환되는 경향을 나타내 보였다.

도약각은 J. Williams가 49.8 °로 가장 크게 나타내 보였으며, T. Barry는 49.4 °, A. Dmitrik은 46.9 ° 순으로 나타내 보

였다. 접지시의 수평속도에 대한 이기지의 연직속도의 비율(속도변환율)을 살펴보면 A. Dmitrik이 76.25%로서 가장 높게 나타내 보였으며, T. Barry는 65.86%, J. Williams는 63.15% 순으로 나타내 보였다.

4. 무릎관절각도의 변화

<Table 4>는 발구름 1보전 및 발구름에 있어 지지다리의 무릎관절각도의 변화를 나타낸 것이다.

무릎관절의 각도의 변화를 살펴보면, J. Williams의 경우 발구름 1보전 접지시 145.4 °, 발구름 1보전 이기지 147.0 °, 발구름 접지시 161.7 °, 발구름 최대 무릎 굴곡시 127.2 °, 발구름 이기지 171.5 °로 나타내 보였다. A. Dmitrik의 경우 발구름 1보전 접지시 146.2 °, 발구름 1보전 이기지 142.7 °, 발구름 접지시 174.1 °, 발구름 최대 무릎 굴곡시 155.3 °, 발구름 이기지 176.4 °로 나타내 보였다. T. Barry의 경우 발구름 1보전 접지시 137.7 °, 발구름 1보전 이기지 132.9 °, 발구름 접지시 176.7 °, 발구름 최대 무릎 굴곡시 133.1 °, 발구름 이기지 170.5 °로 나타내 보였다.

5. 발구름시의 신체의 기울기각

<Table 5>는 발구름 접지시에 있어 후경각, 내경각 및 몸통의 경사각을 나타낸 것이다. 발구름 접지시 후경각은 J. Williams가 37.4 °로 가장 크게 나타내 보였으며, A. Dmitrik 33.5 °, T. Barry 32.8 °순으로 나타내 보였다. 발구름 접지시 내경각은 T. Barry가 34.8 °로 가장 크게 나타내 보였으며, J. Williams 29.7 °, A. Dmitrik 17.6 °순으로 나타내 보였다. 발구름 이기지 몸통각은 T. Barry가 38.3 °로 가장 크게 나타내 보였으며, J. Williams 36.9 °, A. Dmitrik 23.3 °순으로 나타내 보였다.

IV. 논 의

<Figure 6~8>은 남자높이뛰기 메달리스트 선수들의 발구름 2보전 접지부터 신체중심이 최고점에 이를 때까지의 동작을 스틱피겨로 나타낸 것이다(Figure 6, J. Williams, Figure 7, A. Dmitrik, Figure 8, T. Barry).

높이뛰기 종목에서 선수들의 발구름 동작 시 팔과 리드다리의 동작에 따라 다음과 같이 구분되는데, 팔의 스윙은 싱글암(S)형과 더블암(D)형으로, 리드다리의 스윙동작은 굴곡(B)형과 전반에는 무릎을 조금 신전해서 후반에 굴곡해서 스윙하는 반굴곡(HB)형으로 나눌 수 있다(Ae, 1990). 이번 대회에서 금

메달을 획득한 J. Williams의 높이뛰기 동작 시 팔 스윙 운동 형태는 싱글암형이었으며, 은메달을 획득한 A. Dmitrik과 동메달을 획득한 T. Barry는 더블암형이었다. 그리고 싱글암형 팔 스윙을 한 J. Williams의 리드다리는 반굴곡형인데 비해 더블암형 팔스윙을 한 A. Dmitrik과 T. Barry는 리드다리의 스윙동작에서 굴곡형으로 다리스윙을 하였다. 이와 같은 두 형태의 다리 스윙들은 각운동량적 측면에서 더블암형은 좌우의 팔이 생성한 세로축돌래의 각운동량이 상쇄되지만, 싱글암형은 스윙다리와는 반대방향의 각운동량이 생성되는 것으로 해석되고 있다(Kaneko & Fukunaga, 2006). 따라서, 본 연구의 선수들은 발구름 동작에서의 싱글암형 팔스윙-반굴곡형 리드다리 스윙형, 더블암형 팔스윙-굴곡형 리드다리스윙은 역학적으로 합리적인 동작을 하고 있음을 의미한다고 할 수 있다.

세계적인 높이뛰기 선수들을 분석한 선행연구들을 살펴보면, 최고 기록이 2.32m인 선수 16명의 도움닫기 속도가 평균 6.60 ± 0.45 m/s이며, 최고 속도는 7.26 m/s라고 보고하였다(Greig와 Yeadon, 2000); 이진택, 백진호, 김태삼, 2006). 특히 Dapena(1980)와 Dapena(1986), 성낙준(1991)은 발구름 시 수평속도를 감소시키는 것과 수직속도를 증가시키는 것은 상호 종속적인 관계가 있는 것으로 보고하고 있다. 따라서 도약 높이(기록)를 높이기 위해서는 도움닫기의 수평속도를 크게 하면서, 발구름 시 일어나는 속도의 감소를 이륙 시 수직속도로 빠르게 전환시키는 것이 필수적인 조건이라 할 수 있다.

2007년 오사카 세계선수권대회에서 금메달을 획득한 D. Thomas 선수가 2.35 m를 기록할 때의 신체 도약각도인 50.9° 와 비교할 때, 이번 대회 금메달을 획득한 J. Williams(USA)는 49.8° , 동메달을 획득한 T. Barry(BAH)는 49.4° 로서 비슷한 결과를 나타내었으나, 은메달을 획득한 A. Dmitrik(RUS)는 46.9° 로 적은 각도를 나타내었다. 또한 발구름 발의 이지 시 수평속도와 수직속도에서 A. Dmitrik은 다른 선수들에 비해 수평속도가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 A. Dmitrik가 J. Williams와 같은 2.64 m의 최대 신체 중심 높이를 나타내었음에도 불구하고 도약각도가 작음으로 인해 바를 넘는데 어려움이 있었기 때문에 늦은 시기에 2.35 m를 넘어 아쉽게 은메달을 획득한 것으로 사료된다. 그리고 T. Barry(BAH)의 경우에는 상대적으로 2.66 m라는 가장 높은 최대 신체 중심 높이를 나타내었지만 7.51 m/s의 금메달과 은메달 선수들에 비해 상대적으로 느린 수평 속도를 나타내었다. 이는 Williams 8.32 m/s, A. Dmitrik 8.07 m/s에 비해 낮게 나타났으며, 2007년 오사카 대회에서 2.35m를 기록한 D. Thomas의 최대 수평 속도가 7.87 m/s였으므로 보다 좋은 기록을 위해서는 수평 속도의 증가가 필연적으로 요구된다 하겠다. 또한 J. Williams는 2.35m를 기록하여 2007년 세계선수권대회에서 D. Thomas와 Y. Rybakov의 기록과 같았다. 선행연구들에 의하면 파워 플롭

기술을 사용하는 선수도 도움닫기의 속도를 빠르게 해야 하며 도움닫기의 속도가 빨라질수록 도약높이가 증가한다고 보고하였는데, Dapena et al.(1986)은 평균 7.39m/s, Dapena(1987)는 평균 7.4m/s, Conrad et al.(1990)은 평균 7.71m/s, 1990년대 한국대표선수들을 대상으로 연구한 성낙준(1991)은 평균 7.49m/s라고 보고하였다.

본 대회의 금메달 선수인 J. Williams의 최대 수평 속도 8.32 m/s와 이지 시 수직 속도 4.97 m/s는 D. Thomas 와 Y. Rybakov의 최대 수평 속도 7.87 m/s와 7.57m/s, 이지 시 수직 속도 4.64 m/s, 4.45 m/s 보다 높은 수치를 나타내었지만, 발구름 시간이 0.14 sec.로 D. Thomas 0.18 sec., Y. Rybakov 0.192 sec. 보다 짧은 소요시간을 나타내었다. 이에 대한 도호영, 이진택, 백진호(2002)의 선행연구에서는 높이뛰기 선수들의 평균 발구름 시간이 약 0.19 ± 0.01 초로 나타났으며, Dapena et al.(1986)의 연구에서는 평균 0.178 ± 0.017 초, Conrad et al.(1990)의 연구에서는 평균 0.14초로 각각 보고되었다. 따라서 본 대회에서 J. Williams가 수평 운동을 수직 운동으로 전환시키는 발구름 시간을 조금만 늘렸다면 보다 좋은 기록을 수립할 가능성이 있었을 것으로 예측된다.

또한 도약 높이가 높을수록 발구름 시간이 짧은 경향을 보이고 있다. 높이뛰기는 발구름 발이 지면에 닿는 순간의 신체 중심높이(H1), 공중에서 신체중심이 상승한 높이(H2), 신체중심의 최대높이와 바(bar)의 높이 차이(H3) 등 3요인의 총합에 의해서 결정되며(Liboshi, Ae & Yuuki et al., 1994), 이러한 3요인은 발구름 동작에서 발생하는 후경각에 의해 많은 영향을 받는다. 발구름 동작 시 작은 후경각은 발구름 이지 시 바(bar) 쪽으로 신체의 기울임이 빨라지면서 아치(arch)동작이 일찍 만들어져 도약 후 신체가 바(bar)위에 떨어질 가능성이 커지게 되는 단점이 있다. 그러나 발구름 이지 순간에는 상체가 수직에 가까운 직립 자세를 유지해야 신체 중심의 최고 정점 위치를 높게 올릴 수 있게 되어 성공 확률을 높일 수 있다. 본 대회에서 나타난 발구름 발의 접지 시 후경각은 평균 $34.6 \pm 2.5^\circ$ 로 2007년 오사카 대회 입상자들의 평균인 $42.3 \pm 2.02^\circ$ 보다 작았다. 이러한 결과는 본 대회 입상자들의 최대 수평속도와 이지 시 수평 속도가 2007년 선수들에 비해 높았기 때문으로 생각되며, 또한 신체적으로 2007년 선수들의 평균 신장 1.94 ± 0.04 m에 비해 J. Williams와 A. Dmitrik 모두 1.84 m로서 2007년 입상자들보다 상대적으로 작은 신장이었기 때문에 빠른 수평 속도를 이용함과 동시에 2007년 입상자들에 비해 발구름 시 적은 후경각을 유지한 것으로 사료된다.

<Figure 9>는 본 대회 입상자들의 무릎각의 변화를 나타낸 것으로 발구름 동작 시 접지 시(TOON)와 이지 시(TOOF)무릎관절 각도는 J. Williams가 161.7° , 171.5° 였으며, A. Dmitrik 174.1° , 176.4° 이고, T. Barry 176.7° , 170.5° 를 나타내었는데,

side view

back view

backward angle

takeoff angle

takeoff on

takeoff max.

takeoff off

knee joint angles

Figure 6. J. Williams (USA) : Gold Medalist

side view

back view

takeoff angle

backward angle

takeoff off

takeoff max.
knee joint angles

takeoff on

Figure 7. A. Dmitrik (RUS) : silver medalist

side view

back view

takeoff angle

backward angle

takeoff off

takeoff max.
knee joint angles

takeoff on

Figure 8. A. Dmitrik (RUS) : Bronze Medalist

Figure 9. Change of knee angle

2007년 2.35 m를 기록한 D. Thomas는 161°, 172° 그리고 Y. Rybakov는 170°, 174°였다. 본 대회와 2007년 대회의 금메달리스트인 J. Williams와 D. Thomas의 발구름 시 무릎 관절 각도는 접지 시와 이지 시 거의 같은 각도로 나타내 보였으며, 더욱이 접지 시와 이지 시 두 시점 간에 약 10°의 차이를 보이는 공통점을 나타내었다. 이에 반해 다른 선수들은 두 선수들과 비교해 볼 때 접지 시와 이지 시의 각도 차이에서 상이한 결과를 나타내 보였으며, 접지 시 무릎 관절 각도가 금메달을 획득한 선수들에 비해 큰 수치를 보였다. 더욱이 J. Williams와 D. Thomas 두 금메달 선수들은 발구름 시 최대 무릎 관절의 굴곡 운동이 가장 많이 수행된 공통점을 가지고 있었다. 이는 도약에 의해서 높아진 수평 운동을 수직 운동으로 신체를 효율적으로 전환시켜 이지 시 신체 수직 운동을 향상시키기 위한 동작으로 판단된다. 또한 두 선수들은 발구름 발의 무릎 관절 굴곡이 가장 크게 수행되는 공통점을 보였는데, 이는 도약에 의해서 발생된 운동에너지를 발구름을 통해 위치에너지로 전환시키는데 무릎의 굴신 운동을 많이 이용하여 금메달 획득에 긍정적으로 영향을 미친 것으로 사료된다.

Dapena et al.(1986), Dapena(1987), Conarad et al.(1990)는 높이뛰기 발구름 동작 시 구름발의 접지 시 무릎각도는 약 160~175°이고, 이지 시는 166~172°로서 이륙 시에 무릎은 완전 신전이 되지 않는다고 보고하였으며, 이 같은 현상은 발구름 시 다리를 곧게 유지하는 것이 수직 상승력을 높이는데 긍정적인 영향을 준다는 Muraki(1984)와 Reid(1986)의 주장과도 일치한다. 또한 Dapena et al.(1986), Dapena(1987)는 발구름 초기에서 발생하게 되는 신장성 수축의 커다란 장력은 매우 짧은 시간 내에서 유지되는데, 발구름 시 큰 무릎 굴곡은 다리의 지레 역할을 감소시킴으로서, 탄력적인 착지 힘(breaking force)을 수행하지 못하고, 결국 지면 반력의 수직력을 감소시키는 것으로 보고하면서, 발구름 다리는 가능한 구부러지지 않게 버티는 것이 효율적이라고 보고하고 있다. 또

한 발구름 시 발구름 다리가 수직속도를 증가시키는데 절대적인 영향을 주며, 발구름 초기에 발구름 다리의 무릎은 도움닫기에 의한 수평운동량을 저지하는 동작에 의해 굴곡되며, 무릎의 굴곡각도는 지면에 가해지는 힘의 크기와 발구름 시간과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 인식되고 있다.

V. 결 론

본 연구는 2011. 8. 27 - 9. 4(9일간) 대구에서 개최된 2011 대구세계육상선수권대회 높이뛰기 종목에 출전하였던 세계일류선수들의 도약기술 즉, 발구름 전까지의 3개의 스트라이드 동작, 발구름 동작 그리고 공중동작에서의 움직임을 3차원으로 분석함으로써 세계적인 높이뛰기 선수 특히 메달리스트들의 기술에 대한 바이오메카닉스적인 특성을 찾아내고, 국내 높이뛰기 경기력을 위한 현장에서 필요한 정량적인 자료를 얻는데 목적이 있다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 고속카메라 4대를 이용하여 공식대회 결승경기를 촬영한 후 메달리스트들의 가장 높은 기록의 동작들을 운동학적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금메달을 획득한 J. Williams의 높이뛰기 동작 시 팔 스윙 운동 형태는 싱글암 형이었으며, 은메달을 획득한 A. Dmitrik과 동메달을 획득한 T. Barry는 더블암 형이었다.
2. 금, 은메달리스트의 공통점은 발구름 동작 시 접지 시와 이지 시 무릎각도의 굴신 범위가 약 10°였다. 또한 최대 무릎 굴곡각도가 가장 큰 각도를 나타낸 공통점을 발휘하였다(2007년 오사카육상선수권대회와 2011 대구대회의 각각 금메달리스트).
3. J. Williams는 신체중심(1.38 m)을 가장 많이 낮추었다가 가장 많이 수직상승(1.26 m)하였으며, 이는 무릎(127.2°)을 가장 많이 굽히고 후경각(37.4°)을 크게 한 것과 관련이 있다. 신체중심의 속도도 발구름 발 착지시(8.32 → 7.87 m/s)까지 가장 빨랐으며, 발구름 발 이지시에도 수직속도(4.97 m/s)가 가장 빠르게 한 후 도약각도(49.8°)를 가장 크게 나타내 보였다.
4. A. Dmitrik는 발구름의 접촉시간(0.11 sec.)이 가장 짧았으며, 수평의 속도를 수직의 속도로 전환률(76.25%)도 가장 좋았다. 발구름 발의 무릎은 가장 신전된 상태(155.3°)로 점프를 하였으며, 발구름 국면에서 내경각(17.6°)과 몸통각(23.3°)이 가장 작았다.
5. T. Barry는 신체중심의 최대 높이(2.66 m)가 가장 높았으

며, 발구름의 접촉시간(0.19 sec.)도 가장 길었다. 발구름 국면에서 후경각(17.6 °)은 가장 작았으며, 내경각(34.8 °)과 몸통각(38.3 °)은 가장 큰 각을 보였다.

참고문헌

- Ae Michiyoshi(1990). The Use and the Contribution of Body Segments for Take-off of High Jump and Long Jump. *Japanese Journal of Sports Science*, 9(3), 130-136.
- Ae Michiyoshi(1996). Body Segment Parameter of Japanese Boys and Athletes. *Japanese Journal of Sports Science*, 15(3), 155-162.
- Ae Michiyoshi, Nagahara Ryu, Oshima Yuji, Koyama Hiroyuki, Takamoto Megumi & Shibayama Kazuhito(2010a). Biomechanical Analysis of Women's High Jump Winners in IAAF World Championships in Athletics Osaka 2007. In The Performance and Techniques of the World's Top Athletes. (Ed.). *Nippon Rikujijo Kyogirenmei*, 171-175.
- Ae Michiyoshi, Nagahara Ryu, Oshima Yuji, Koyama Hiroyuki, Takamoto Megumi & Shibayama Kazuhito(2010b). Biomechanical Analysis of Men's High Jump Winners in IAAF World Championships in Athletics Osaka (2007). In The Performance and Techniques of the World's Top Athletes. (Ed.). *Nippon Rikujijo Kyogirenmei*, 165-170.
- Ae Michiyoshi(1992). Sports Performance measured by Biomechanical Method. *Japanese Journal of Sports Science*, 11(11), 725-729.
- Bothmischel, V. E.(1990). Model characteristics of the high jump run-up. *Modern Athlete and Coach*, 28(4), 3-6.
- Conrad, A., & Ritzdorf, W.(1990). Scientific research project at the games of the XXIIth olympiad : Biomechanical analysis of the high jump. *New Studies in Athletics*, 1, 177-217.
- Dapena, J.(1980). Mechanics of translation in the fosbury flop. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1), 37-44.
- Dapena, J.(1987). Basic and applied research in the biomechanics of high jumping, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(suppl.), 19-33.
- Dapena, J.(1988). *Biomechanical Analysis of the Fosbury Flop(part I)*. *Track Technique*, 104, 3307-3317.
- Dapena, J., Feltner, M., & Bahamonde, R.(1986). *Biomechanical of High jump #5(men)*. Report for scientific services project(USOC/TAC).
- Do, H. Y., Lee, J. T., & Back, J. H.(2002). A kinematic Analysis of the last 3 strides of the Run-up and Take-off Motion in the Men's High Jump. *The Korean Journal of Physical Education*, 41(5), 837-850.
- Greig, m.p., & Yeadon, M.R.(2000). The influence of touchdown parameters on the performance of a high jumper. *Journal of Applied Biomechanics*, 16, 367-378.
- Iiboshi A., Ae M., Yuuki M., Takamatsu J., Nagasawa M & Tan H. P.(1994). Biomechanical Analysis of High Jumpers. In The Techniques of the World's Top Athletes. (Ed.). *Nippon Rikujijo Kyogirenmei*, 169-184.
- Iiboshi Akira, Ae Michiyoshi, Yuuki Masahiro, Takamatsu Junji, Nagasawa Mitsuo & Tan Hai Peng(1994). Biomechanical Analysis of High Jumpers. In The Techniques of the World's Top Athletes. (Ed.). *Nippon Rikujijo Kyogirenmei*, 169-184.
- Kaneko M., Fukunaga T.(2006). *Biomechanics (Scientific Basics of Physical Exercise)*. Tokyo : Kyorin-Shoin.
- Kaneko masahiro, Fukunaga Tetsuo(2006). *Biomechanics (Scientific Basics of Physical Exercise)*. Tokyo : Kyorin-Shoin.
- Lee, J. T.(2011). Analysis of Impulse Force and Kinematic Factors of the Limbs during Stefan Holm's Take-off Phase and Penultimate Stride of High Jump. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 21(1), 097-105.
- Lee, J. T., Baek, J. H., & Kim, T. S.(2006). The Kinematic Analysis of the Take off Phase about the Male High Jumpers in the 16th Asian Athletics Championships. *Korean Journal of Sport Science*, 17(2), 134-143.
- Mizumura Shinji, Yamamoto Toshiharu(1990). Relationship between the Take-off Movement and the Ankle Injury on High Jump (Fosbury Flop), In Research of Jump. (Ed.). *Japanese Society of Biomechanics*, 221-226.
- Muraki, Y.(1984,Summer)/ Fundamentals of approach running & takeoff. *Track Technique*, 89, 2843-2845.
- Reid, p.(1986). Approach and take-off for the back lay-out high jump. *NSCA Journal*, 8(1), 5-9.
- Sung, R. J.(1991). *Take-off Motions in Fosbury flop*. Seoul National Graduate University.
- Sung, R. J.(2004). Analysis of the Angular Momentum for the Bar Clearance Motion in the Fosbury Flop. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 14(3), 119-134.