

Stefan Holm의 높이뛰기 발구름 동작에서의 충격력과 상지와 하지 분절의 운동학적 분석

이진택¹

¹대한체육회

Analysis of Impulse Force and Kinematic Factors of the Limbs during Stefan Holm's Take-off Phase and Penultimate Stride of High Jump

Jin-Taek Lee¹

¹Korea Sports Council, Seoul, Korea

Received 31 October 2010; Received in revised form 6 November 2010; Accepted 14 March 2011

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the kinetic factors of Stefan Holm's take-off motion and provide the technical data. Collected data of the subject (height: 181 cm, weight: 71 kg, record: 230 cm) were used for the last two strides and take-off phase. The results were as follows: The vertical impulse force was 2044.8 N which was 2.49 times and the anterior-posterior impulse force was -1306.4 N which was 1.88 times of the subject's weight. The take-off leg angular velocities (ω_x , ω_y) were switched drastically from clockwise to count clockwise direction between two-step touchdown and take-off. The highest jerk of the take-off foot was 368.97 m/s³ during the two step take-off and the take-off foot made an impact to the ground with 1225.07 m/s³ during the one step touchdown.

Keywords : Take-off Motion, Impulse Force, Touchdown, Counterclockwise, Clockwise

I. 서론

한국 육상은 2011년 대구세계육상선수권대회의 유치로 인해 경기력 향상에 총력을 기울이고 있으며, 대한육상경기연맹은 문화관광부에 제출한 한국육상발전방안 보고서에서 이 대회에서 메달획득을 위하여 경기력이 세계 10위권 이내 있는 종목 10개를 발굴 육성하겠다고 발표하였다(대한육상경기연맹, 2008). 그 중에 남자 높이뛰기가 포함되어 있으며, 선정된 이유는 2년마다 열리는 세계육상선수권대회에서 1997년 6회 대회인 아테네에서 결승 8위, 1999년 7회 대회에서도 결승 6위까지 오르는

역대경기에서 상위성과 더불어 메달에 근접한 가능성을 보여 주었기 때문이다.

높이뛰기는 J자형의 도움단기를 사용하며, 선수가 자신의 인체를 수평운동에서 수직운동으로 전환시켜 얼마나 높이 뛰는가를 겨루는 경기이다. 높이뛰기의 순위는 기록과 시기 차를 통해 등위를 가리며 경기력에 직접적인 영향을 미치는 요인으로는 신체적 요건인 체격과 체력 그리고 수직상승력을 최대화시키는 효율적인 기술이라고 할 수 있다(Lee, 2005). 세계 엘리트 높이뛰기 선수들과 국내 엘리트 선수들과의 신체적 조건을 살펴보면 세계기록 보유자인 Javier Sotomayor(197 cm, 76 kg), 1996년 올림픽 우승자인 Charles Austin(184 cm, 76 kg), 그리고 2004년 올림픽과 2008년 슈퍼 그랑프리에서 우승자인 Stefan Holm(181 cm, 71 kg)이며(Lee, 2005), 현재 국내 엘리트 선수들의 평균 신장과 체중은 188 cm와 70 kg으로 세계적인 높이뛰기 선수들과 체격적인 면에서는 뒤지지 않는다고 할 수 있다. 한

Corresponding Author : Jin-Taek Lee
Taereung Training Center, Korea Sports Council, 729 Hwarangro,
Nownon-Gu, Seoul, Korea
Tel : +82-2-949-3061 / Fax : +82-2-949-3060
E-mail: wbjlee@hanmail.net

국 높이뛰기는 1997년 한국 기록 234 cm가 수립된 이후 높이뛰기 경기력은 계속적으로 하강세를 지속하고 있으며, 2007년도에는 221 cm까지 떨어졌으나, 그래도 220 cm이상을 유지하였다. 그러나 2008년부터는 215 cm에 머물고 있는 실정이다. 이처럼 경기력의 저하가 세계적인 선수들과의 체격적인 면이 아니라면 앞서 기술한 체력과 수직상승력을 위한 기술적 측면에 국내 엘리트 높이뛰기 선수들이 취약하지 않을까 라고 생각할 수 있다.

높이뛰기는 신체의 강인한 체력과 더불어 도움닫기 마지막 3보에서 발구름 동작까지의 기술적인 측면이 경기력에 영향을 미친다(Lee, Back & Kim, 2006). 특히 발구름 동작은 인체를 수직으로의 전환시키는 기술로 여기에는 신체 각 분절들의 운동학적 변인들이 조화가 이루어져야 최상의 기술을 발휘할 수 있다(Ae, 1990; Bothmischel, 1990; Dapena, 1980a, 1988b). 이처럼 효율적인 발구름을 하기 위해서는 도움닫기 마지막 세(three) 스트라이드에서의 준비동작과 빠른 수평속도가 필요하다.

Sung(1991)은 도움닫기 수평속도를 빠르게 하는 것이 도약높이를 증가시킬 수 있다고 보고하였으며, 이는 도움닫기와 발구름 동작의 인과관계의 중요성을 더욱더 강조한 것이다.

높이뛰기에서 발구름 동작은 선수가 지면에 얼마나 힘(force)을 가하느냐에 따라 신체중심의 높이를 최대화 할 수 있고 더불어 각운동량도 극대화 할 수 있다(Dapena, 1997). 이후 신체가 공중으로 비행을 시작하면서 선수의 자세는 종축을 중심으로 신체를 비틀어(twisting somersault) 회전(rotation)을 하게 되고, 바(bar) 위의 최고 정점에서 반듯이 누운 자세가 된다. Dapena(1997)는 이러한 동작이 이루어지기 위해서는 발구름 동작에서 이미 준비가 되어져 있어야한다고 지적하였고, 이때의 자세는 신체가 뒤로 기울어진 후경자세가 되고 발구름하는 다리의 힙(hip)이 반대쪽 보다 낮아져 있어야 한다고 하였다. 그러나 발구름 동작에서의 후경자세와 낮아진 한쪽 힙은 발구름발이 착지하면 신체가 비틀어지면서 회전되는 동작이 되는데, 이 동작이 지나치게 커지면 발구름 다리의 도약력을 감소시키고 작으면 신체의 회전이 적어져 상체의 등으로 높이뛰기 바를 넘을 수 없게 되는(twist rotation), 문제를 발생시키며, 이러한 문제를 선수들이 어떻게 해결하는지를 조사하고 이러한 정량적인 자료를 현장의 코치와 선수들에게 경기력 향상을 위해서 제공해 줄 필요가 있다.

국내 높이뛰기 선수들의 경기력 향상을 위해서 대구세계선수권대회 조직위원회는 2005년부터 매년 대구국제육상경기대회를 개최하고 있으며, 세계 Top 랭크에 속하는 선수들을 초청하여 국내선수들과 경쟁시키고 있다. 높이뛰기도 그 중 한 종목으로 2004년 아테네 올림픽에서 금메달을 획득한 스웨덴의 Stefan Holm선수를 초청하였고 2006년 대구국제육상경기대회에서 230 cm의 기록으로 우승하였다. 현재 남자 높이뛰기 경기력

은 230 cm대에 근접하면 세계 Top 랭크에 들 수 있어 국내 엘리트 선수들에게 좋은 결과를 기대할 수 있다. 그러나 앞서 기술하였듯이 국내 높이뛰기 기록의 향상도는 현재 제자리 걸음 이 아니라 뒷걸음 치고 있는 실정이다. 더욱이 국내에서 230 cm를 뚫 기록의 분석을 한 자료는 현재 전무한 실정이며, 국내 선수와 신장의 차이가 없는 외국선수를 분석하여 자료를 제공한 사례도 없었기 때문에, 실제 현장에서 선수나 코치 및 감독들에게 국제적 경쟁력을 갖출 수 있는 실용적인 기술적 자료를 제시하지 못하고 있다.

과거에 높이뛰기는 선수 대부분의 신장이 2 m 내외로 장신 선수들의 전유물이었으나, 2004년 아테네 올림픽에서 우승한 스웨덴의 Stefan Holm선수의 등장으로 이러한 고정관념이 무너졌다. 단신인 스웨덴의 Stefan Holm선수는 체격의 열쇠를 극복하고 체력과 기술적 요인을 크게 부각시킨 예라고 볼 수 있다. 현재 국내 국가대표 선수들은 신장이 190 cm를 넘는 선수가 드문 상황이므로 체격적 요인보다는 체력과 기술적 요인을 바탕으로 경기력을 향상시키는 것이 관건이 될 수 있다고 볼 수 있다.

이 연구는 체력적인 측면을 배제하고, 기술적인 측면에 비중을 두어 현장에서 필요한 기술적인 자료를 제시하는 것이며, 이러한 연구 목적을 달성하기 위하여 단신인 스웨덴의 Stefan Holm선수를 대상으로 하는 사례연구로써 세 스트라이드에서의 준비동작과 빠른 수평속도와 발구름(Take-off)동작에서의 두 스트라이드와 발구름 동작의 운동역학적인 요인들을 조사하는 것이다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상자

이 연구의 대상자는 2006년 대구국제육상경기대회 결승에 진출하여 우승한 남자 높이뛰기 선수를 선정하였으며, 피험자의 연령은 30 year, 신장 181 cm, 체중 71 kg이다.

2. 실험 절차

이 연구에서는 JVC GR-HDIKR 비디오카메라 3대와 Kwon3D 3.1 영상분석용 프로그램이 사용되었다. 3대의 비디오카메라는 연구대상자의 도움닫기 마지막 2 스트라이드와 발구름 동작 및 공중자세까지의 운동수행과 통제점 틀을 60 fields/sec의 프레임 속도와 1/1000의 셔터노출 시간으로 촬영하였다. 각 카메라의 위치는 부채꼴 모양으로 관중석에 설치하였으며, 카메라 #1은

높이뛰기 매트 중심을 우측에, 카메라 #2는 정면에, 카메라 #3은 좌측면에 설치하여 촬영 범위가 서로 겹치도록 하였다. 카메라의 촬영구간은 연구대상자가 도약하기 전 마지막 3보에서부터 바를 완전히 넘어 갈 때까지로 설정하였다. 실 공간좌표계를 설정하기 위하여 가로, 세로, 높이 100 cm x 100 cm x 300 cm의 통제점 틀을 만들어 가로 700 cm, 세로 720 cm의 직사각형 모양의 평면 위에 4개의 통제점 틀을 각 모서리에 세웠다. 36개의 통제점을 디지털이정한 결과 1.34 cm의 측정오차를 보였다. 분석된 시기는 230 cm의 3번의 시기 중 성공한 시기를 분석에 사용하였다. 3대의 카메라에 대한 동조는 발구름하는 발이 지면으로부터 떨어지는 시점을 동조시점으로 하였고, Kwon3D 3.1 프로그램에 내장되어 있는 perform software genlock 기능을 이용하여 동조시켰다(Figure 1).



Figure 1. Setting of experimental situation

3. 자료 분석

통제점 틀의 3차원 공간좌표와 21개의 관절점의 3차원 좌표 값은 Kwon3D 3.1 프로그램에 내장되어 있는 DSM 방법을 이용하여 산출하였다. 디지털이정한 운동학적 변인들은 Kwon3D 3.1 프로그램을 이용하여 산출하였다. 디지털이정은 분석하고자 하는 시점과 종점의 전후 각각 5프레임을 더 디지털이정하였고, 인체의 모델링은 20개의 관절점과 14개의 분절로 정의하였다. 그리고 인체분절지수는 Plagenhoef(1983)의 자료를 이용하였다. 노이즈를 제거하기 위하여 사용된 스무딩 방법은 버터워스(butterworth) 4차 저역통과필터(low-pass filter)를 사용하였으며, 이때 차단주파수는 7.4 Hz로 설정하였다. 실공간의 전역좌표계(global reference frame)는 높이뛰기 매트를 정면에서 바라본 관점에서 높이뛰기 매트의 좌측 후방에 원점을 두고 X축은 조주로의 측면 좌·우방향이며, Y축은 운동방향, Z축은 지면과 직교하는 수직방향으로 세 축이 직교가 되도록 정의하였다. 발구름 동작의 운동역학적 자료를 분석하기 위하여 이벤트와 국면을 설정하였다(Figure 2). 발구름 지지국면동안에 발생하는 평

균 충격력은 충격량(impulse momentum; Hay, 1992)수식을 이용하여 아래의 수식으로 산출하였다.

$$\bar{F} \cdot t = m \cdot (v_f - v_i)$$

$$\bar{F} = \frac{m \cdot (v_f - v_i)}{t}$$

여기서 \bar{F} 는 평균 힘(average force), t 는 지지시간, m 은 선수의 체중, v_f 와 v_i 는 이륙과 착지순간 속도이다.

발구름하는 동안에 각 분절의 각속도는 다음과 같이 산출하였다.

분절의 정의는 팔의 경우 손, 전완, 상완을 하나의 팔 분절로 정의하였고, 다리는 발, 하퇴, 대퇴를 하나의 분절로 Kwon3D 프로그램에서 정의하였다.

양팔의 각속도는 어깨를 기점으로 2보 접지순간에서부터 1보 이륙순간까지 상체에 대한 팔의 스윙되는 구간에 대한 각속도로 각 성분별 각속도를 산출하였다. 그리고 자유로운 다리 혹은 리드하는 다리와 발구름하는 다리의 각속도는 고관절을 기점으로 2보 이륙순간에서부터 1보 이륙순간까지 상체에 대한 다리의 스윙되는 구간에 대한 각속도로 각 성분별 각속도를 산출하였다. 끝으로 발구름하는 발이 얼마나 빨리 지면에 충돌하는가(jerk라고 함)를 알아보기 위해서 2보 접지순간부터 1보 발구름 접지까지 가속도를 시간으로 미분하여 값을 산출하였다.

$$Jerk_{event} = \frac{da}{dt}, Jerk_{phase} = \left| \int_0^t \left(\frac{d^3 r}{dt^3} \right) dt \right|$$

여기서 $Jerk$ 는 발구름하는 발이 2보 접지순간부터 1보 접지까지의 충돌 빠르기, t 는 소요시간, a 는 2보 접지에서 1보 접지순간까지 선가속도이다.

1) 이벤트(Event)

- Event 1 : 3보 이륙순간
- Event 2 : 2보 접지순간
- Event 3 : 2보 이륙순간
- Event 4 : 1보 접지순간
- Event 5 : 1보 이륙순간 혹은 발구름 도약순
- Event 4 : 1보 접지순간
- Event 5 : 1보 이륙순간 혹은 발구름 도약순간

2) 국면(Phase)

- Phase 1 : 3보 이륙순간에서 2보 이륙순간까지의 스트라이드
- Phase 2 : 2보 이륙순간에서 1보 이륙순간까지의 스트라이드

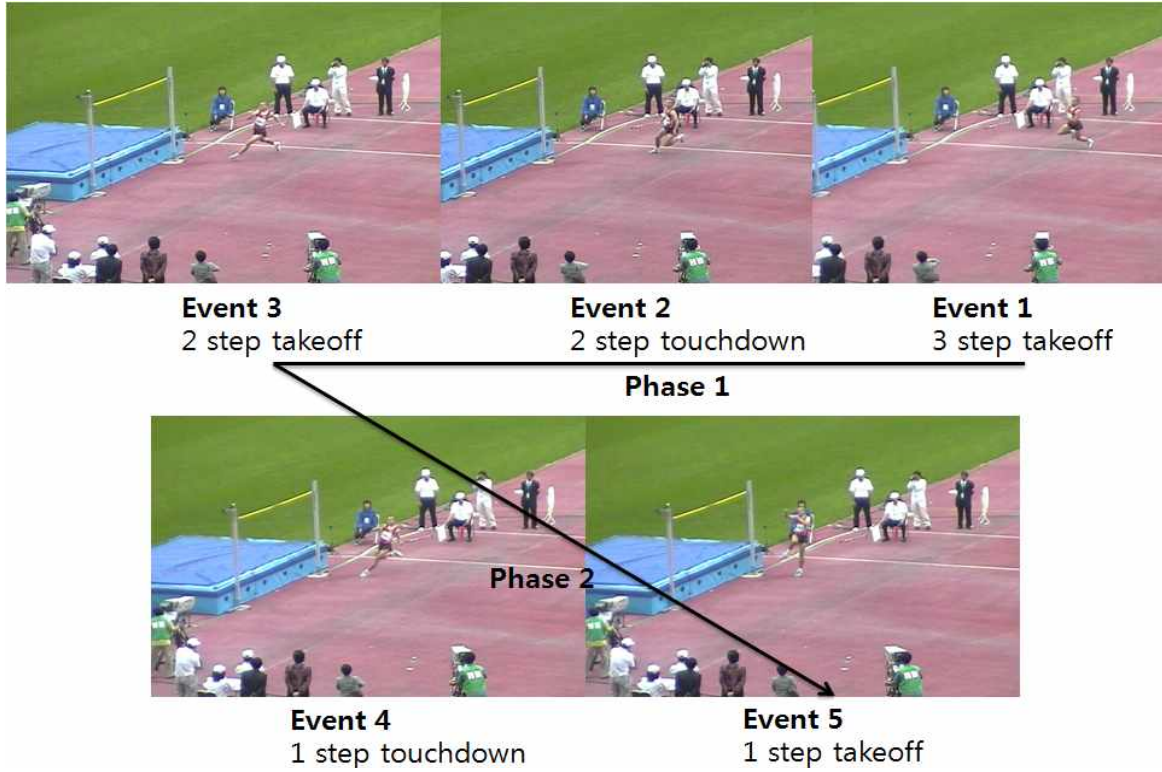


Figure 2. Events and phases

III. 결 과

1. 충격력

발구름하는 동안에 충격력은 수직 충격력이 가장 높게 나타났으며 그 값은 2044.8 N으로 선수의 체중에 2.94배로 조사되었다.

그리고 수평 충격력은 -1306.4 N으로 선수의 체중에 1.88배로 나타났고 좌우 충격력은 695.8 N으로 선수의 체중에 1.00배로 조사되었다(Table 1).

Table 1. Average Impulse force at the takeoff

Event	Average medio-lateral force(N)	Average anterior-posterior force(N)	Average vertical force(N)
During Jump Takeoff	695.8 (1.00)	-1306.4 (1.88)	2044.8 (2.94)

() : normalized value(BW)

2. 속도

도움닫기 2스트라이드에서 신체중심의 좌우, 수평, 수직속도를 살펴보면, 3보 이륙순간(E1)에서 2보 접지순간(E2)까지의 좌

우속도는 각각 4.97 m/s, 4.46 m/s로 감속되고, 수평속도는 각각 5.72 m/s, 5.90 m/s로 속도가 증가되는 것으로 나타났다. 그리고 2보 이륙순간(E3)부터 좌우속도와 수평속도가 각각 5.71 m/s, 4.17 m/s로 좌우속도가 증가되는 속도 전환 시점으로 나타났다. 이후 발구름 접지순간(E4)에는 좌우와 수평속도가 각각 5.04 m/s, 5.26 m/s로 유사한 속도를 보였다. 마지막으로 도약순간에는 좌우속도가 3.57 m/s로 수평속도 2.50 m/s보다 더 크게 나타났으며, 감속되는 속도는 수평속도가 더 큰 것으로 나타났다. 수직속도는 2보 이륙순간부터 1보 접지순간까지 각각 0.69 m/s, 0.12 m/s로 나타났으며 도약순간에는 4.44 m/s로 크게 증가되는 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2. Center of mass velocities of touchdown and takeoff at the at the two strides (unit: m/s)

Events	Lateral velocity (v_x)	Horizontal velocity (v_y)	Vertical velocity (v_z)
3step takeoff(E1)	4.97	5.72	0.55
2step touchdown(E2)	4.46	5.90	-0.91
2step takeoff(E3)	5.71	4.17	0.69
1step touchdown(E4)	5.04	5.26	0.12
1step takeoff(E5)	3.57	2.50	4.44

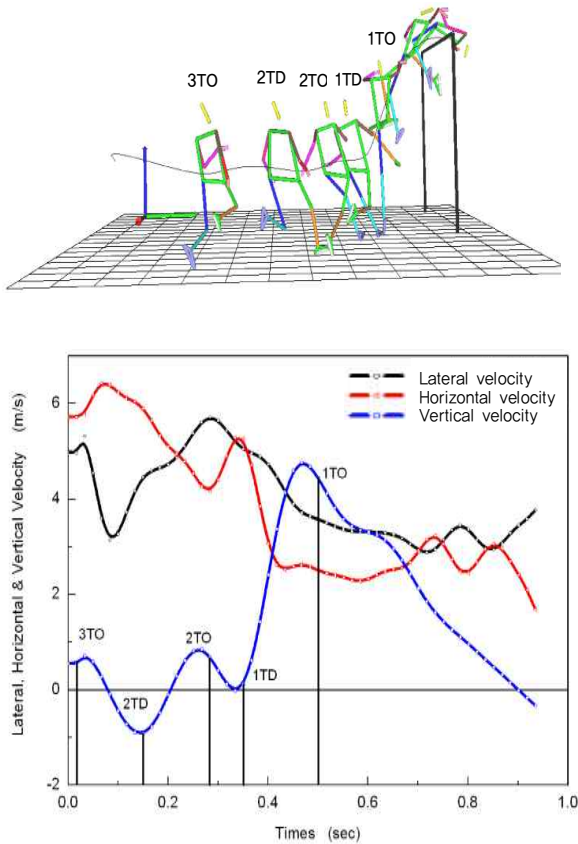


Figure 3. Lateral, horizontal & vertical velocities of touchdown and takeoff at the two strides. 3TO: 3step takeoff, 2TD: 2step touchdown, 2TO: 2step takeoff, 1TD: 1step touchdown, 1TO: 1step takeoff

3. 신체중심의 위치와 상·하지 분절중심의 각속도

도움닫기 마지막 2스트라이드의 신체중심의 높이는 3보 이륙 순간부터 2보 이륙순간까지 88 cm에서 89 cm로 낮게 신체중심의 높이를 유지하는 것으로 나타났다. 그리고 이후 1보 접지에서 이륙순간까지 48 cm의 급격한 신체중심의 높이 변화를 보였다.

상·하지 분절의 각속도를 이벤트별로 보면 3보 이륙순간에는 발구름하는 다리, 리드하는 다리, 오른팔, 왼팔이 각각 823.52 deg/s, 365.13 deg/s, 732.04 deg/s, 508.62 deg/s로 지역좌표계의 수직축에 대하여 반시계 방향으로 큰 각속도를 나타냈다. 특히 이 이벤트 시점에서 발구름 다리와 오른팔은 서로 상반되는 분절에 대하여 더 높은 각속도를 보였다. 2보 접지와 이륙순간에 발구름하는 다리의 ω_x 와 ω_y 각속도는 시계방향(-205.49 deg/s, -68.21 deg/s)에서 반시계방향(164.64 deg/s, 246.59 deg/s)으로 급격한 변화를 하는 것으로 나타났다. 그리고 리드하는 다리와 오른팔에서도 ω_x 와 ω_y 의 각속도 성분의 값이 각각 -191.15 deg/s에서 165.34 deg/s로, -288.64 deg/s에서 191.45 deg/s로 크게 변화하는 것으로 나타났다. 그러나 왼팔은 ω_x 와 ω_z 가 각각

-45.70 deg/s에서 137.32 deg/s로, -427.62 deg/s에서 643.31 deg/s로 급격하게 변화되는 것으로 나타났다. 1보 접지순간에 발구름하는 다리의 ω_x 와 ω_y 각속도 성분이 리드하는 다리보다 크게 나타났으며, ω_z 각속도 성분만이 서로 상반되는 방향으로 유사하게 나타났다. 그리고 오른팔의 모든 각속도 성분들이 작아지고 왼팔의 ω_z 각속도 성분만 크게 나타났다. 1보 이륙순간의 각속도는 발구름하는 다리에서 ω_z 각속도 성분이 접지에서 이륙순간에 급격하게 방향이 전환되었다.

Table 3. Center of mass vertical position and angular velocities of upper and lower extreme segments for center of mass at the takeoff and touchdown respectively (unit: m, deg/s)

Events	3TO (E1)	2TD (E2)	2TO (E3)	1TD (E4)	1TO (E5)	
CM Height	0.88	0.87	0.89	0.90	1.38	
Take off Leg	ω_x	-90.80	-205.49	164.64	-102.41	-175.87
	ω_y	-81.33	-68.21	246.59	135.37	-48.95
	ω_z	823.52	152.25	49.31	-195.26	353.40
Lead Leg	ω_x	41.72	-191.15	165.34	-42.42	-168.22
	ω_y	16.01	-62.24	253.99	1.48	-55.12
	ω_z	365.13	88.80	12.97	193.04	135.35
Right Arm	ω_x	-65.34	-288.64	191.45	-68.98	-168.38
	ω_y	-59.46	-107.00	319.70	47.03	-52.06
	ω_z	732.04	457.17	-249.19	54.51	-81.11
Left Arm	ω_x	-0.68	-45.70	137.32	-34.61	-166.79
	ω_y	-13.01	-15.53	77.98	-12.22	-46.51
	ω_z	508.62	-427.62	643.31	204.24	66.40

3TO : 3step takeoff(left foot), 2TD : 2step touchdown(right foot), 2TO : 2step takeoff, 1TD : 1step touchdown(left foot), 1TO : 1step takeoff.

그리고 리드하는 다리는 ω_x 각속도 성분 시계방향으로 증가되고 ω_z 각속도 성분은 반시계 방향으로 감소되는 것으로 나타났다. 또한 1보 이륙순간에 양팔은 ω_x 각속도 성분이 거의 유사한 크기의 값으로 시계방향으로 각속도가 증가되는 것으로 나타났다(Table 3).

4. Jerk(발구름 발)

발구름하는 발의 가속도와 jerk는 2보 이륙순간에 각각 196.66 m/s²와 368.97 m/s³로 가장 높게 나타났다. 그리고 1보 접지순간에 jerk가 190.97 m/s³로 크게 감소되는 것으로 나타났다. 국면별 jerk는 2보 접지에서 이륙순간까지는 723.53 m/s³이었으나 1보 접지순간에는 1225.07 m/s³으로 증가되었고, 지면을 향해 발구름하는 발이 빠르게 충돌하는 것으로 나타났다.

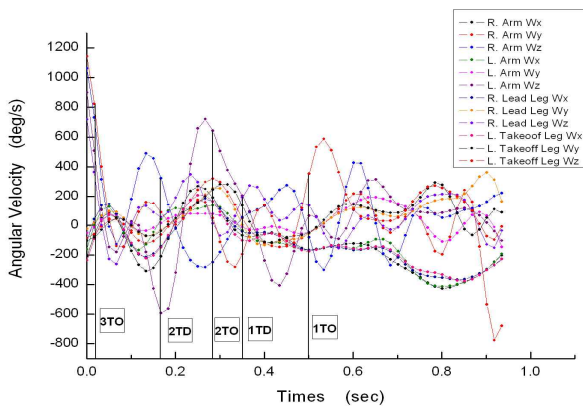


Figure 4. Changes of angular velocities of upper and lower extreme segments during the takeoff and touchdown of two striding

IV. 논 의

이 연구는 2004년 아테네 올림픽에서 우승한 스웨덴의 Stefan Holm 선수를 대상으로 기술적인 측면에 비중을 두어 현장에서 필요한 기술적인 발구름(take-off) 동작에서의 운동역학적인 요인들을 조사하여 자료를 제시하는 것이다.

대항운동인 점프 높이는 인간의 파워와 근역학을 연구하기 위한 측정변인으로 종종 사용되며 점프 높이를 결정하는 일반적인 기술 중 하나는 충격 방법(impulse method)이다(Street, McMillan, Board, Rasmussen & Heneghan, 2001). 이 방법은 충격량과 관계가 있으며, 발구름하는 동안에 선수에 의해 발휘되는 순수한 수직력을 적분하면 발구름 수직속도를 조사할 수 있으며, 그리고 발구름 수직속도는 점프 높이를 결정하는 중요한 변인이 된다(Dapena, 1992).

이 연구에서 발구름하는 동안에 수직 충격력과 전후(수평) 충격력은 각각 2044.8 N과 -1306.4 N으로 나타났다. 높이뛰기는 다른 도약종목과 달리 수직운동을 하는 종목으로 수직 충격력과 전후(수평) 충격력이 클수록 경기력이 우수하다고 할 수 있다. 그 이유는 전후(수평) 충격력은 도움단기로부터 획득한 수평속도를 수직으로 전환시키는 역할을 하고 수직 충격력은 점프 높이를 결정하기 때문이다. 같은 도약 종목이면서 수평운동을 하는 세단뛰기 경우 수직 충격력은 홑(2419 N)에서 3.2배, 스텝(2860 N)에서 3.8배, 점프(2776 N)에서 3.7배(Hay & Miller, 1985), 그리고 Dyson(1977)은 홑에서 4배, 스텝에서 3.8배라고 보고하였다. 반면에 전후(수평) 충격력은 홑(-360 N)에서 0.5배, 스텝(-625 N)에서 0.8배, 점프(-460 N)에서 0.6배(Hay & Miller, 1985), 그리고 Ryu와 Yeo(2008)는 홑(-433.50 N)에서 0.58배, 스텝(-511.80 N)에서 0.68배, 점프(-519.68 N)에서 0.69배라고 보고하였다. 이 처럼 수직운동과 수평운동에서 수직 충격력은 얼마나 높이 혹은 얼마나 멀리 뛰는가를 결정하는 중요한 운동역학

적 변인이라는 점을 확인 할 수 있었다. 그리고 전후(수평) 충격력은 수직운동인 높이뛰기에서 경기력과 관련하여 중요한 운동역학적 변인이며, 수평운동에서는 경기력에 저해되는 운동역학적 변인이라고 할 수 있다.

도움단기와 발구름 순간의 신체중심의 속도는 2보 이륙순간(E3)을 시점으로 좌우속도와 수평속도가 각각 5.71 m/s, 4.17 m/s로 좌우속도가 증가되는 속도 전환 시점으로 나타났다. 그리고 1보 혹은 발구름 접지순간(E4)에는 좌우와 수평속도가 각각 5.04 m/s, 5.26 m/s로 유사한 속도를 보였다. 2보 이륙순간의 좌우속도의 증가는 신체의 운동방향을 높이뛰기 바로 향해 일직 기울어지지 않게 하면서 점프할 수 있는 공간을 확보하기 위한 것이라고 할 수 있다(Lee et al, 2006). 일반적으로 발구름 접지순간에 선행연구들의 결과들을 살펴보면 Do, Lee와 Back(2002)은 좌우와 수평속도가 각각 5.83 m/s와 3.98 m/s라고 보고 하였고, Lee, Yoon과 Ryu(2002)는 좌우와 수평속도가 각각 5.92 m/s와 4.26 m/s라고 보고 하였다. 국내 선수들을 대상으로 한 선행 연구들과 이 연구의 결과가 상이하게 나타났는데, 국내 선수들은 발구름 접지순간에 좌우속도가 수평속도보다 높게 나타났지만, 이 연구의 대상자는 거의 동일한 속도를 나타냈으며, 이는 발구름 순간에 좌우와 수평속도의 제어능력이 뛰어나다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 좌우속도가 크면 높이뛰기 바를 측면으로 많이 비행하게 되고 수평속도가 크면 바를 향해 빨리 신체가 기울어져 높이 점프하기 전에 바에 걸리게 될 것이다.

이 연구에서 도움단기 속도(resultant velocity)는 2보 이륙순간에 7.10 m/s이었던가 구름발 접지순간에 7.29 m/s로 증가되는 현상을 보였다.

도움단기 속도와 관련하여 Sung, Jung와 Shin(1989)과 Sung(1991)은 발구름 접지순간의 속도를 빠르게 해야 하고, 이 구간에서 속도가 빨라질수록 도약높이를 증가시킬 수 있다고 하였다. 그러나 Dapena, Feltner와 Bahamonde(1986)는 도움단기 속도가 2스트라이드보다 발구름 접지순간에 조금 감소된다고 하였다. 그리고 Dapena(1992)는 발구름 접지순간에 속도가 평균 7.10 m/s라고 보고하였다. 이 연구의 결과는 Sung et al.(1989)이 보고한 도움단기의 목적인 신체중심을 가속시켜 발구름 접지순간에 발구름의 적합한 최고의 속도를 갖게 하고 1스트라이드에서 속도의 감속보다 최고의 속도를 갖는 형태가 바람직하다는 것과 연구의 결과가 일치한다. 따라서 도움단기 1스트라이드에서 발구름 발의 접지순간의 속도증가는 경기력과 관련이 있다고 판단 된다.

발구름 접지와 이륙순간에 수직속도는 1보 접지순간에 0.12 m/s로 도약순간에는 4.44 m/s로 나타났다.

Dapena(1988)와 Sung(1991)은 발구름 접지순간에 신체중심의 수직속도가 -0.61~-0.04 m/s로 보고 하였으며, 발구름 초기 단계에서 신체를 수직 상방향으로 추진시키면서 발구름이 이루어져

야 신체중심의 수직 하방향의 속도의 부담을 줄이고 쉽게 신체를 비행할 수 있다고 하였다. 그리고 가능한 발구름 접지순간에 수직속도가 0 m/s에 가깝게 하는 것이 효율적이라고 하였다. 이런 측면에 이 연구의 대상자는 발구름 접지순간에 신체중심을 낮추어 발구름 준비를 하고 접지순간과 동시에 신체중심의 수직 속도를 상승시키면서 발구름을 한다는 면에서 신체를 효율적으로 활용하여 수직속도를 얻는다고 할 수 있다. 그러나 도약순간에 수직속도는 국내 선행연구인 Lee et al.(2002)의 연구 결과 4.79 m/s와 Do et al.(2002)의 연구 결과 4.50 m/s 그리고 Lee et al.(2006)의 연구 결과 4.49 m/s보다 작았다. 이 연구의 대상자는 도약순간의 수직속도를 증가시킬 필요가 있다고 판단된다.

도움닫기에서 신체중심의 높이는 3보 이륙순간부터 2보 이륙순간까지 88 cm에서 89 cm로 낮게 신체중심의 높이를 유지하다가 1보 접지에서부터 높아지기 시작하여 이륙순간까지 48 cm의 급격한 신체중심의 높이 변화를 보였다. 이러한 결과는 Dapena(1988)가 주장한 세 가지 유형의 도움닫기 중 가장 바람직한 형태인 발구름 2~3보전에 신체중심의 높이를 낮추고 마지막 1스트라이드에서 지면과 평행하게 높이를 유지하다가 발구름 접지순간부터 상승시키면 수직속도를 크게 할 수 있다는 것과 일치한다. 즉 1보 접지순간에 수직속도가 양의 값을 가진다는 것은 이미 2보 이륙순간에서 1보 접지순간의 도움닫기 1스트라이드 비행구간에서 발구름 준비가 이루어져서 신체중심의 위치가 상승하고 있는 상황에서 발구름이 이루어지고 있다는 것을 의미한다.

상·하지 분절의 각속도를 이벤트별로 보면 3보 이륙순간에는 발구름하는 다리, 리드 다리, 오른팔, 왼팔이 각각 823.52 deg/s, 365.13 deg/s, 732.04 deg/s, 508.62 deg/s로 지역좌표계의 수직축에 대하여 반시계 방향으로 큰 각속도를 나타냈다. 3보 이륙순간은 신체가 내경을 그리는 가장 큰 구간으로 이때 원심력이 절정에 다다른 시점이다. 따라서 상지와 하지는 이 원심력에 저항하기 위하여 어깨와 힙 관절의 수직축에 대하여 반시계 방향으로 각속도를 증가시킨다고 할 수 있다.

2보 접지와 이륙순간에 발구름하는 다리의 ω_x 와 ω_y 각속도는 시계방향에서 반시계방향으로 급격한 변화를 하는 것으로 나타났다. 이와 같은 변화는 발구름 다리를 빨리 끌어 당겼다가 신체 앞으로 빨리 신전시킴으로써 발구름 발의 접지 속도를 높여 지면에 가하는 충격력을 높이기 위함이라고 판단된다.

리드 다리와 오른팔은 ω_x 와 ω_y 의 각속도 성분의 값이 그리고 왼팔은 ω_x 와 ω_z 가 급격하게 변화되는 것으로 나타났다. 리드 다리와 오른팔의 ω_x 와 ω_y 의 각속도 성분의 값이 크다는 것은 발구름 준비를 위해 리드 다리는 앞에서 뒤로 신체를 추진시키기 위함이고, 오른팔과 왼팔은 백스윙에서 전상방향으로, 전방에서 백스윙으로 빠르게 스윙하기 때문에 나타나는 현상이다.

1보 접지순간에 발구름하는 다리의 ω_x 와 ω_y 각속도 성분

이 리드하는 다리보다 크게 나타났다. 이는 발구름하는 다리가 접지순간에 신체를 끌어당기면서 반시계 방향으로 회전시키기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다. 그리고 ω_z 각속도 성분만이 서로 상반되는 방향으로 유사하게 나타났다. 이처럼 ω_z 각속도 성분이 상반되는 현상은 발구름하는 다리가 지면에 접지하면서 도움닫기 속도에 의해 시계방향으로 회전하려고 하는 것을 리드하는 다리가 반시계 방향으로 힘차게 끌어 올림으로서 서로 상쇄시키는 역할을 하는데 이러한 현상이 수직상승력을 높이는 결과를 초래한다고 할 수 있다.

1보 이륙순간의 각속도는 발구름하는 다리에서 ω_z 각속도 성분이 접지에서 이륙순간에 급격하게 방향이 전환되고, 리드하는 다리의 ω_x 각속도 성분이 시계방향으로 증가되고 ω_z 각속도 성분은 반시계 방향으로 감소되는 것으로 나타났다. 발구름하는 다리의 ω_z 각속도 성분의 급격한 변화는 리드하는 다리의 ω_x 각속도 성분과 ω_z 각속도 성분의 결과에서 초래되는 현상이라고 할 수 있다.

리드하는 다리를 끌어당기는 역할은 ω_x 각속도 성분이 하는 것이고, 발구름하는 다리의 급격한 회전의 변화는 리드하는 다리의 ω_z 각속도 성분이 접지순간부터 증가하다가 도약순간에 좌측 어깨방향으로 끌어당기면서 감속되기 때문에 일어나는 것이다.

1보 이륙순간에 양팔은 ω_x 각속도 성분이 시계방향으로 각속도가 증가되는 것으로 나타났다. 이는 발구름을 하는 동안에 양팔이 수직방향으로 스윙되었다는 것을 의미하고, 이륙순간부터는 시계방향으로 회전되면서 신체를 높이뛰기 바(bar) 위로 끌어올리는 역할을 한다고 판단된다.

앞에서 기술한 상하지 분절의 각속도 성분들의 역할은 Sung(1991)이 보고한 추진다리와 리드하는다리 및 양팔의 서로 반작용적인 동작으로 발생하는 추진동작에 의해 몸통과 발구름 다리를 통해 지면에 전달되고, 이로 인해 수직력을 증가시킬 수 있다는 것과 일치한다고 할 수 있다. 이러한 상하지 분절의 상호 반작용적 동작들은 신체를 회전시키고 높게 비행시키는데 도움을 주고 있다고 해석된다.

발구름하는 발의 가속도와 jerk는 2보 이륙순간에 각각 196.66 m/s²와 368.97 m/s³로 가장 높게 나타났다. 국면별 jerk는 2보 접지에서 이륙순간까지는 723.53 m/s³이었으나, 1보 접지순간에는 1225.07 m/s³으로 지면을 향해 발구름하는 발이 빠르게 충돌하고 있었다. 이 연구에서 jerk에 대한 선행연구가 없어 서로 비교할 수는 없지만 발구름하는 발이 2보 이륙순간에서 1보 접지순간까지 얼마나 빨리 지면에 접촉하고 이 빠르기가 빠를수록 지면에 가하는 충격력과 제동력이 크다고 판단된다. 따라서 높이뛰기 선수는 도움닫기 1스트라이드를 빠르게 가속하여 발구름을 하기 위해서는 이 구간의 jerk를 증가시킬 수 있는 능력이 필요하다고 판단된다.

V. 결론

이 연구는 2006년 대구국제육상경기대회 결승에 진출하여 우승한 스웨덴의 남자 높이뛰기 Stefan Holm 선수를 연구 대상으로 기술적인 측면에 비중을 두어 현장에서 필요한 기술적인 자료를 제시하는 것으로 발구름(take-off) 동작에서의 운동역학적인 요인들을 조사하기 위하여 수행되었다.

발구름하는 동안에 수직 충격력과 전후(수평) 충격력이 높게 나타났다. 수직 충격력은 얼마나 높이 뛰는가를 결정하는 중요한 운동역학적 변인이라는 점을 확인 할 수 있었다. 그리고 전후(수평) 충격력은 수평운동에서 수직운동으로 전환시키는 중요한 제어적 기능의 운동역학적 변인이라고 할 수 있다.

도움닫기와 발구름 순간의 신체중심의 속도는 2보 이륙순간에 좌우속도와 수평속도가 속도 전환 시점으로 나타났고 발구름 접지순간에는 좌우와 수평속도가 거의 유사한 속도로 균등한 변화를 보였다. 2보 이륙순간의 속도 전환의 변화는 바(bar)와 발구름 발사이의 도약공간을 확보하는데 필수적인 도움닫기 기술이라고 할 수 있다. 그리고 도약을 위한 접지순간의 균등한 좌우와 수평속도는 발구름 다리의 속도 제어능력이 뛰어나다는 것을 알 수 있었다.

발구름 이륙순간에 수직속도는 국내의 선행연구 결과보다 작게 나타났고, 이 연구의 대상자는 도약순간의 수직속도를 증가시키기 위한 기술적 동작의 개선이 필요하다고 판단된다.

도움닫기에서 신체중심의 높이는 3보 이륙순간부터 2보 이륙순간까지 낮게 신체중심의 높이를 유지하다가 1보 접지에서부터 이륙순간까지 신체중심의 큰 높이 변화를 보였다.

상·하지 분절의 각속도는 3보 이륙순간에 지역좌표계의 수직축에 대하여 반시계 방향으로 큰 각속도를 발생시켰고 이는 상지와 하지가 곡선주로서의 원심력에 저항하기 위하여 어깨와 힙 관절의 수직축에 대하여 반시계 방향으로 각속도를 증가시킨다는 것을 알 수 있었다. 2보 접지와 이륙순간에 발구름하는 다리의 ω_x 와 ω_y 각속도는 시계방향에서 반시계방향으로 급격한 변화를 보였고 이는 지면에 가하는 충격력을 높이기 위함이라고 판단된다.

리드하는 다리와 오른팔은 ω_x 와 ω_y 의 각속도 성분의 값이 급격하게 변화되는 것으로 나타났다. 이 각속도 성분의 값이 크다는 것은 발구름 준비를 위해 신체를 앞에서 뒤로 추진시키기 위함이고 오른팔은 백스윙에서 전상방향으로 빠르게 스윙하기 때문이다.

1보 접지순간에 발구름하는 다리의 ω_z 각속도 성분이 서로 상반되는 방향으로 유사하게 나타났다. ω_z 각속도 성분이 상반되는 현상은 발구름하는 다리가 지면에 접지하면서 도움닫기 속도에 의해 시계방향으로 회전하려고하는 것을 리드하는 다리

가 반시계 방향으로 힘차게 끌어 올림으로서 서로 상쇄시키는 역할을 하기 때문이라고 판단된다.

1보 이륙순간에 발구름하는 다리의 ω_z 각속도 성분의 급격한 변화는 리드하는 다리의 ω_x 각속도 성분과 ω_z 각속도 성분의 결과에서 초래되는 것으로 판단된다.

1보 이륙순간에 양팔은 ω_x 각속도 성분이 시계방향으로 증가되는데 이는 발구름을 하는 동안에 양팔이 수직방향으로 스윙되고 이륙 이후 시계방향으로 회전되면서 신체를 바(bar) 위로 끌어올리는 역할을 한다고 판단된다.

발구름하는 발의 jerk는 2보 이지순간에 가장 높게 나타났고 국면별 jerk는 1보 접지순간에 가장 높게 나타나 발구름하는 발이 지면을 향해 빠르게 충돌하고 있음을 알 수 있었다. 발구름하는 발이 지면에 접촉하는 빠르기가 빠를수록 지면에 가하는 충격력과 제동력이 크고 이 구간의 jerk를 증가시킬 수 있는 능력이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- Ae, M.(1990). High jump and Long jump Take-off of the contribution of body parts. *Japanese Journal of Sports Science*, 9(3), 130-136.
- Bothmischel, V. E.(1990). Model characteristics of the high jump run-up. *Modern Athlete and Coach*, 28(4), 3-6.
- Dapena, J.(1980a). Mechanics of translation in the fosbury flop. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1), 37-44.
- Dapena, J., Feltner, M., & Bahamonde, R.(1986), *Biomechanical Analysis of High Jump #5(Men)*. Report fo Scientific Services Project.
- Dapena, J.(1988). *Biomechanical Analysis of the Fosbury Flop(part I)*. Track Technique, 104, 3307-3317.
- Dapena, J.(1992). *Biomechanical Studies in the High Jump and the Implication to Coaching*. Track & Field Quarterly Review, 92(4), 34-38.
- Dapena, J.(1997). Contributions of Angular Momentum and Catting to the Twist Rotation in High Jumping. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 239-253.
- Do, H. Y., Lee, J. T., & Baek, 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.
- Dyson, G. H. G.(1977). *The Mechanics of Athletics*. London:

University of London Press Ltd, 194.

- Hay, J. G., & Miller, J. A.(1985). Techniques used in the triple jump. *International Journal of Sports Biomechanics*, 1, 185-196.
- Hay, J. G.(1992). The biomechanics of the triple jump: A review. *Journal of Sports Science*, 10, 343-378.
- KAAF.(2008). *Korean Plans to Promote Track & Field Development Plan*. Seoul: Track & Field Development Committee.
- Lee, J. T., Yoon, H. J., & Ryu, J. K.(2002). A kinematic Analysis of the Last 3 Strides of the Run-up and Take-off Motion in the Men's High Jump. *Korean Journal of Sports Science*, 41(4), 591-599.
- 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 Sports Science*, 17(2), 134-143.
- Plagenhoef, S.(1983). *Anatomical Data for Analyzing Human Motion*. Research Quarterly for Exercise and Sports, 54(2), 169-178.
- Ryu J. K., & Yeo, H. C.(2008). Analysis of Impulse Force and Kinematic Variable to the University Male's Triple Jumpers. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 18(4), 209-216.
- Street, Gl., McMillan, S., Board, W., Rasmussen, M., & Heneghan, J. M.(2001). Sources of Error determining countermovement jump height with the impulse method. *Journal of Applied Biomechanics*, 17, 43-54.
- Sung, R. J., Chung, C. S., & Shin, I. S.(1989). Biomechanical analysis of the High Jump Technical(II). *Korean Journal of Sports Science*, 1(4), 90-119.
- Sung, R. J.(1991). *Take-off Motions in Fosbury flop*. Seoul National Graduate University.