



한국운동역학회지, 2004, 제14권 3호, pp. 119-134
Korean Journal of Sport Biomechanics
2004, Vol. 14, No. 3, pp. 119-134

높이뛰기의 바 넘기 동작을 위한 각운동량 분석

성낙준*(호서대학교)

ABSTRACT

Analysis of the Angular Momentum for the Bar Clearance Motion in the Fosbury Flop

Sung, Rak-Joon*(Hoseo University)

R. J. SUNG. Analysis of the Angular Momentum for the Bar Clearance Motion in the Fosbury Flop. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 14, No. 3, pp. 119-134, 2004. The purpose of this study was to analyze the angular momentum characteristics of the Fosbury Flop high jump and the role of the body segments for the production of 3 angular momentum components. The subjects were three male jumpers who were former Korean national team players. Their jumping motions were analyzed using the DLT method of three-dimensional cinematography. The conclusions were as follows.

1. All the forward angular momentum needed to clear the bar was created in the take-off phase. Take-off leg was the great contributor of the forward angular momentum. On the other hand, free leg produced large opposite angular momentum.
2. All subject had some lateral angular momentum before the take-off phase. Head and free leg had major contribution to the lateral angular momentum production. Take-off leg produced opposite angular momentum.

* rjsung@office.hoseo.ac.kr

3. All subject had some twisting angular momentum, which make the back of the athlete turn to the bar, before the take-off phase. Free leg was the major contributor of the twisting angular momentum. Head and trunk was the second contributor of the twisting angular momentum.
4. Total angular momentum needed to clear the bar had no significant correlation to the jumping height.
5. Subject who made excessive angular momentum showed different pattern of angular momentum production and had a poor record compared to other subject.

KEY WORDS : FOSBURY FLOP, ANGULAR MOMENTUM, TWISTING, SOMERSAULT

I. 서 론

높이뛰기의 경기 기록은 뛰어 오른 높이가 아닌 넘어간 바의 높이에 의해 결정되므로, 발구름 동작의 목표는 크게 1) 최대한 높이 뛰어 오르는 것과 2) 효율적으로 바를 넘어가는 것의 두 가지로 나눌 수 있다. 이중 첫 번째 목표와 관련된 논문들은 많이 발표되어 왔으나(Dapena, 1980a; Ae, Shibukawa, Tada & Hashihara; 1983; Ae, Sakatani, Yokoi, Hashihara & Shibukawa, 1986; Dapena, Feltner & Bahamonde, 1986; Dapena & Chung, 1988; Dapena, Ncdonald & Cappaert, 1990; Ae, 1990; 성낙준, 2003), 두 번째 목표와 관련된 연구물은 많지 않은 편이며(Dapena, 1980b; Dapena & Jung, 1986; Dapena, 1998 (summer)) 국내의 경우 이에 대한 연구물이 발표된 것이 없다.

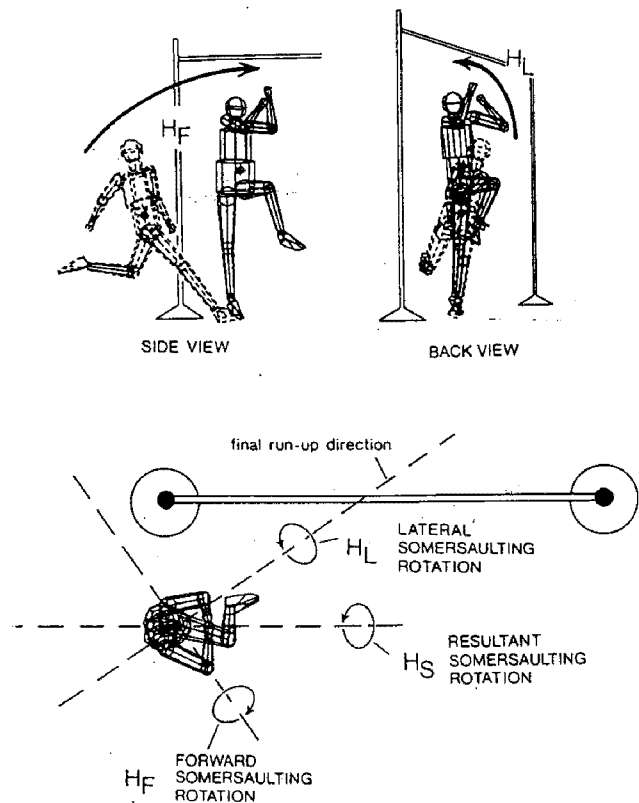


그림 1. 섬머셀링 각운동량(Dapena, 1986- 원편 도움닫기로 변형하였음)

높이뛰기에서 효율적으로 바를 넘어가기 위한 주요 요인은 1) 적절한 도움닫기 경로와 발구름 위치 2) 발구름 할 때 공중에서 신체를 회전시키기 위한 적절한 각운동량(角運動量)을 만드는 것, 3) 이륙 시의 수평 수직속도에 맞추어 무게 중심에 대한 관성모멘트를 적절히 조절하여 신체의 회전 속도를 조절하는 것이다(성 낙준, 1991). 따라서 실제 바 넘기 동작에서는 이 세 가지 요인을 다 고려해야 하지만, 본고에서는 이들 중 두 번째 요인인 바를 넘어갈 때의 비틀며 뒤로 회전하는 동작 (twisting back somersault)에 필요한 각운동량의 특성에 대해 고찰해 보고자 한다.

본고에서 밝히고자 하는 것은 바를 넘어가는데 필요한 비틀기(twisting)와 공중회전(somersaulting)의 각운동량의 크기와 방향 그리고 발구름 시에 이러한 운동량을 만들어 내는 신체분절들의 역할이다.

포스배리 플롭 기술은 바를 넘어 갈 때 뒤로 눕는 자세(back layout position)를 취하며, 등을 아치(arch)형태로 구부려 무게 중심이 몸 밖에 위치하게 함으로써 무게 중심의 최고 높이와 바(bar)간의 차이(여유 높이)를 최소화 시키고 있다. 이러한 기술적 특성으로 인하여 높이뛰기 선수는 발구름시에 비틀며 뒤로 회전하는 동작에 필요한 적절한 각운동량을 발생시켜야 한다(Dapena, 1980b). 선수가 발구름을 하여 이륙을 하고 나면 추가적인 각운동량을 만들 수 없으며, 무게 중심에 대한 몸 전체의 각운동량은 불변인 것으로 볼 수 있다. 바를 넘어 갈 때 뒤로 누운 자세를 취하기 위해서는 비행기의 전반부에서 신체의 장축(longitudinal axis)을 중심으로 한 신체 회전을 일으킴으로써 등이 바를 향하게 하는 트위스팅 각운동량(twisting angular momentum, \mathbb{H}_Z)과 바를 넘어 갈 때 신체의 좌우축을 중심으로 한 공중회전(somersault)을 일으키는 공중회전 각운동량(somersaulting angular momentum, \mathbb{H}_S)이 필요하다(Dapena, 1980b, 1988(summer); Dapena와 Jung, 1986). 공중 회전 각운동량은 다시 마지막 스트라이드에서 무게 중심의 진행 방향을 축으로 하여 측방(側方)으로의 신체 회전을 일으키는 측방 각운동량(\mathbb{H}_{LEAN})과 신체의 진행방향 쪽으로 회전을 일으키는 전방(前方) 각운동량($\mathbb{H}_{FORWARD}$)으로 나눌 수 있으며, 이 두 각운동량의 합(\mathbb{H}_S)이 공중회전 각운동량으로서, 공중회전 각운동량의 벡터 방향은 공중회전의 축이 된다<그림 1>. 우측발 발구름을 하는 선수(왼편 도움 달기)는 무게 중심의 진행 방향을 축으로 신체를 좌측으로 회전하게 하는 측방 각운동량($-\mathbb{H}_L$, 오른 편 도움달기는 $+\mathbb{H}_L$)과 중심의 진행 방향 쪽으로 회전하게 하는 전방 각운동량(\mathbb{H}_F)이 필요하다.

바를 넘어가는 비행 상태에서는 1) 선수가 일으키는 모든 동작은 신체의 다른 어떤 부위에 크기가 동일하고 방향이 반대인 반작용을 수반하게 된다는 원리와 2)무게 중심에 대한 분절들의 관성모멘트가 크면 회전이 느려지며, 관성 모멘트가 작아지면 회전이 빨라진다는 원리에 의해 공중회전의 속도를 조절하게 된다(Hay & Dapena, 1985, 1986).

여기서 가져 볼 수 있는 의문은 발구름 시에 발생하는 각 운동량은 도약 높이가 높아질수록 더 커지는가 아니면 일정한가에 관한 것이다. 이 문제에 대해 Ecker(1976), Doherty(1980)는 발구름을 할 때 각운동량을 크게 하기 위해서는 무게 중심에 대한 편심력을 더 많이 작용시켜야 하므로, 도약 높이에는 불이익이 있게 된다고 하였으며, Hay(1985)는 극단적으로 "도약의 정점에서 좋은 자세를

가짐으로서 얻어지는 이득은 좋은 자세를 갖기 위해 발구름 시에 발생된 수직력의 손실을 상쇄하는 것에 불과하다"고 하였다. 그러나 좋은 공중동작이 없이는 자신이 뛰어오른 높이를 충분히 기록에 반영시킬 수 없기 때문에, 발구름 시에 바를 넘어가는데 필요한 최소한의 각운동량을 생성하는 것은 불가피한 것일 수 밖에 없다. 따라서 선수들은 바를 넘어가는데 필요한 최소한의 각운동량만을 생성함으로써 수직력의 손실을 최소화할 것으로 예상된다.

전술한 각운동량이 의미를 갖기 위해서는 발구름 시에 이러한 각운동량을 만드는 신체 분절들의 역할을 이해해야 한다. 이를 위해서는 발구름 시 신체 분절별 각운동량의 변화를 살펴보는 것이 필요하다. 이륙 시 무게 중심에 대한 각운동량의 크기와 방향은 구름발 착지 시에 갖고 있는 각운동량, 구름발 착지시의 자세, 발구름 동안의 신체 분절들의 동작에 의해 결정된다.

전방 각운동량은 대부분 구름발을 착지했을 때 구름다리가 신체의 선운동을 저지하기 때문에 발생되며, 측방 각운동량은 곡선주로 내부로 기울어져 있는 자세가 발구름 시에 바로 서는 동작에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(Dapena, 1980b). 따라서 발구름 시에 몸의 진행 방향에 대해 몸을 뒤로 젖힌 정도를 나타내는 후경각(後傾角, backward lean angle)과 옆으로 기울인 정도를 나타내는 측경각(側傾角, lateral lean angle)은 각각 전방과 측방 각운동량의 생성에 영향을 주는 요인으로 볼 수 있다.

발구름 시에 추진다리(free leg)와 동체는 트위스팅 각운동량을 만들어 내는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. Dapena (1980b)는 발구름 단계에서 생성되는 트위스팅 각운동량은 대부분 추진다리(차올리는 다리, 평균 63.7%)와 양 팔의 동작에 의해 결정되며, 이륙 후의 트위스팅 각운동량은 구름발 착지 직전에 생성되어 있는 트위스팅 각운동량의 2배 이상이었다고 보고하고 있어, 추진 다리의 역할이 큼을 보여주고 있다. 반면에 발구름 시에 트위스팅 각운동량을 만들기 위해 추진 다리의 무릎을 지나치게 신체의 중심쪽으로 차는 동작은 수직력의 감소를 초래하게 되며(Dapena (Humphrey, 1984에서 재인용)), 세계적인 선수들은 추진다리를 신체를 회전시키는데 이용하지 않는다는 주장도 있어(Reid, 1986), 다소 상반된 견해를 보이고 있다. 일부 선수들은 바를 넘어갈 때 등이 바를 향하게 하는 동작에 부담을 느끼고 있으며, 발구름 시에 지지발을 비트는 잘못된 동작을 하는 선수도 적지 않다. 따라서 발구름시 트위스팅 각운동량의 생성 기전을 올바르게 이해하는 것은 좋은 기록을 위한 필수적 지식이 될 것이다.

II. 연구 방법

전술한 연구 문제들을 규명하기 위해, 국내 우수 높이뛰기 선수들의 실제 높이뛰기 동작을 촬영하여 분석하였다. 분석을 위한 실험 절차와 분석한 시기의 특성은 성 낙준(2003)의 연구에 상술되어

있는바와 같다. 선수들의 동작은 성공한 시기의 자료만 분석하였으며, 분석한 동작은 14시기로서 기록은 1.80m ~ 2.20m 였다. 분석한 선수들의 특징은 표1과 같다. 분석한 역학량은 발구름 전후의 ABZ축에 대한 각운동량, 발구름 시 신체분절 별 각운동량의 변화이다.

표 1. 피험자의 특징

피험자	성(性)	연령	신장(m)	체중(Kg)	최고 기록(m)	도움닫기 방향
S1	M	20	1.82	71	2.22	Right
S2	M	21	1.76	63	2.21	Right
S3	M	20	1.81	70	2.25	Left

인체 모델은 인체의 분절들을 21개의 관절점에 의해 연결된 강체(rigid body)의 연결 시스템(linked system)으로 정의하였으며, 실제 분절은 14개로 이루어져 있다. 동체의 중심선은 양 견관절(肩關節)을 잇는 선의 중심과 고관절(股關節)을 잇는 선의 중심을 연결한 선으로 하였다. 신체 분절의 무게 중심 위치에 대한 인체 분절 자료(body segment parameter)는 Plagenhoef, Evans와 Abdelnour (1983)의 자료를 이용하였으며, 신체 분절의 관성 모멘트 값은 Whitsett(1963)의 값을 이용하였다. 분절의 무게 중심점의 좌표와 전신 무게 중심의 좌표 그리고 이들의 속도와 가속도는 성낙준 등(1987)이 개발한 프로그램을 이용하였으며, 각운동량은 성낙준(1991)에 기술된 방법에 의해 분석하였다.

본 연구에서는 1) XYZ 관성 직교 좌표계와 2) ABZ 관성 직교 좌표계의 2개의 관성 직교 좌표계를 이용하여 동작을 기술하였다<그림 2>. XYZ 관성 직교 좌표계는 고정된 오른손 직교 좌표계로서, 도움닫기의 방향에서 볼 때 좌측 바 지주(bar standard)의 하단을 원점으로 하여, 바와 평행하며 우측 지주를 향하는 축을 + X축으로 정한 것이다. 따라서, + Y 축은 바와 수평면 상에서 직교하며 바 후방을 향하며, + Z축은 X,Y와 직교하면서 수직 상방을 향한다. 이 XYZ좌표계는 선수의 동작을 바와 지주의 위치에 상대적인 것으로 나타내어 준다. 피험자 간의 비교 분석을 용이하게 하기 위해 우측 도움닫기(왼발 발구름)를 하는 선수들의 공간 좌표를 Y축 대칭 변환하여 좌측 도움닫기(오른발 발구름)를 하는 동작으로 바꾸었다. ABZ 관성 직교 좌표계는 도움닫기의 마지막 스트라이드의 체공기에서 신체 중심(CG)의 수평 속도 벡터를 A축으로 하고, 이 벡터에 수평으로 직교하는 벡터를 B축으로 정한 것이다(Dapena, 1980b). 따라서, Z축은 XYZ좌표계와 마찬가지로 수직 상방을 향하지만, A축과 B축은 도움 달기의 마지막 체공기에서의 수평 속도 벡터의 방향에 따라 피험자별로 다르다. ABZ좌표계는 선수의 발구름 동작 자체를 기술하는데 유용하다<그림 2>.

본 연구에서 이용한 각운동량 계산방법을 약술하면 다음과 같다. 인체의 CG를 지나는 축 Q에 대한 각운동량은 축에 대한 14개 분절들의 각운동량을 합한 것과 같다. 각 분절들의 각운동량은 자전 성분(local term)과 공전 성분(transfer term, remote term)의 합으로 볼 수 있다. 분절들을 실린더(cylinder)형태로 가정하면, 각 분절들의 자전 성분 각운동량은 분절의 좌우축(transverse axis)에 대

한 분절의 회전에 의한 각운동량과 분절의 장축(longitudinal axis)에 대한 회전에 의한 각운동량의 합으로 볼 수 있다(Dapena, 1978).

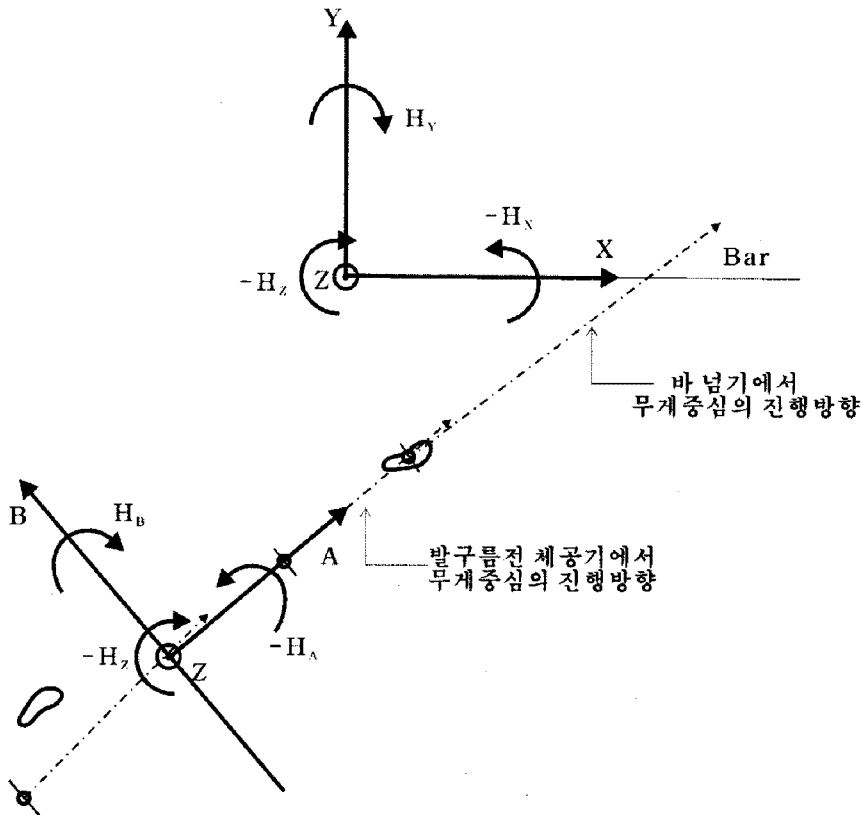


그림 2. XYZ 좌표계와 ABZ좌표계에 대한 각운동량의 성분들

분절의 좌우축에 대한 자전 성분 각운동량의 계산에는 Whitsett(1963)의 신체 분절 관성 모멘트 값을 이용하였으며, 동체는 전후축과 좌우축에 대한 평균 관성 모멘트 값을, 나머지 분절들은 좌우축에 대한 관성 모멘트 값을 이용하였다. 분절 i 의 좌우축에 대한 관성 모멘트 값 IT_i 는 각 피험자에 대해 식 $IT_i = I^*T_i \cdot M \cdot S^2 / (M^* \cdot (S^*)^2)$ 에 의해 표준화(normalize)하였다(Dapena, 1978). 여기에서 I^*T_i 는 Whitsett에 의한 i 번째 분절의 좌우축에 대한 관성모멘트 값, M 과 S 는 피험자의 질량과 신장, M^* 과 S^* 는 Whitsett이 연구한 피험자의 평균 질량과 신장이다.

분절의 수직축에 대한 자전성분 각운동량은 동체를 제외한 분절의 수직축에 대한 회전은 측정하기가 어려우며, 동체외의 분절에서는 수직축에 대한 각운동량의 자전성분이 매우 적기 때문에 수직축에 대한 각운동량의 자전성분은 동체에 대해서만 계산하였으며, 그 외의 분절에 의한 각운동량은 0으로 가정하였다(Dapena,1978). 분절 i 의 수직축에 대한 관성 모멘트 값 IL_i 는, 질량이 같은 경우 키가 큰 사람은 작은 사람보다 분절이 가늘며, 신장이 같은 경우 무게가 많이 나가는 사람이 분절이

두껍다는 가정 하에 각 피험자에 대해 식 $I L_i = I^* L_i \cdot M^2 \cdot S^* / (M^*)^2 \cdot S$ 에 의해 표준화(normalize)하였다(Dapena, 1978). 여기서 $I^* L_i$ 는 Whitsett에 의한 i 번째 분절의 수직축에 대한 관성모멘트 값, M 과 S 는 피험자의 질량과 신장, M^* 과 S^* 는 Whitsett이 연구한 피험자의 평균 질량과 신장이다.

동체의 수직축에 대한 각운동량 계산에 필요한 각속도는 동체를 상하로 양분하여 고관절을 잇는 가상 분절과 양 견관절을 잇는 가상 분절의 분절 벡터에서 구한 각속도 $\omega T(\text{hip})$, $\omega T(\text{shoulder})$ 를 동체의 장축 분절 벡터에 투사시켜 구하였다. 구해진 두 각속도는 각각 동체의 상부와 하부 장축에 대해 표준화된 관성 모멘트 값과 곱하여, 동체 분절의 자전성분 각운동량을 계산하였다(Kwon et al., 1990). 피험자들 간의 비교를 위해서 각 피험자의 각운동량 값들을 각 피험자의 질량*(신장)²으로 나누어 표준화하였다. 표준화된 각운동량의 단위는 $10^{-3} S^{-1}$ 이며, 각운동을 일으키는 순수한 능력을 나타내는 지표가 된다.

CG에 대한 전체 각운동량은 ABZ좌표계에 대한 각운동량을 구하였다. 체공기에서 CG에 대한 전체 각운동량은 각운동량 보존의 법칙에 의해 보존되므로, 발구름 전과 후의 체공기에서의 전체 각운동량은 평균값을 이용하였다. 체공기에서 CG에 대한 전체 각운동량은 보존되지만 각 신체 분절들의 각운동량은 일정하지 않다. 그 이유는 한 분절의 각운동량의 변화는 다른 분절들의 반대 방향의 각운동량으로 상쇄되기 때문이다. 발구름 시 발생한 각운동량에 대한 신체분절들의 역할을 이해하기 위해 신체 분절별 각운동량의 변화를 분석하였다.

분석한 변인들에 대한 피험자별 주요 역학량은 도약 시기별로 발췌하여 표로 작성한 후, 피험자별 평균과 전체시기에 대한 평균과 표준 편차를 계산하였다. 높이뛰기의 경기 기록은 뛰어 넘은 바의 높이에 의해 결정되지만, 실제 선수의 퍼포먼스는 선수가 뛰어 오른 최고 높이를 기준으로 평가하는 것이 더 합리적이므로, 도약의 결과는 뛰어 오른 최고 높이를 기준으로 하였으며, 이는 2.02m ~ 2.29m의 범위였다. 분석한 각각의 역학량들이 도약의 높이가 높아짐에 따라 어떠한 경향을 나타내는지를 알아보기 위하여, 도약의 최고 높이를 독립변인으로 하고, 각각의 역학량들을 종속 변인으로 하여, 도약의 최고 높이와의 상관값(r)을 구하였다. 통계치의 계산은 통계 프로그램 SAS의 상관 분석 프로그램인 PROC CORR를 이용하여 수행하였으며, 계산된 상관값은 피어슨의 적률 상관 계수이다. 분석 결과표의 r 은 각 변인의 도약 높이와의 상관값을 나타낸다. 상관 값이 0.6 이상이고, 두 변인 간의 모 상관계수가 0이라는 귀무가설을 검증하는 상관의 유의 확률 값이 5% 이하인 것을 유의한 상관이 있는 것으로 판단하였다.

Ⅲ. 결과 및 논의

발구름 전의 마지막 체공기와 발구름 후 바를 넘어갈 때의 체공기에서 비틀기(twisting)와 공중회전(somersaulting) 각운동량을 분석한 결과는 <표 2>와 같았다. 이륙 후의 각운동량은 일정해야 하지만, 측정의 오차와 캐팅(catting) 동작(Dapena, 1997)으로 인해 다소의 변이를 보일 수 있으므로 평균값을 취하였다.

표 2. 발구름 전후 두 체공기에서의 전체 각운동량의 평균($10^{-3}/\text{sec}$, ABZ 좌표계).

피험자	발구름 前			발구름 後				
	Ha	Hb	Hz	Ha	Hb	Hs	Hz	
s1	평균	-3.59	-10.93	-19.47	-79.21	102.47	129.55	-38.75
s2	평균	2.18	-21.03	-1.48	-98.66	72.02	123.31	-45.68
s3	평균	-22.22	-25.68	-12.56	-82.44	82.06	116.61	-45.40
	평균	-8.18	-19.80	-10.5	-87.30	84.30	122.70	-43.60
전체	표준편차	14.19	8.75	12.3	11.41	15.46	7.93	7.60
	상관계수	.39	-.03	.10	-.23	-.13	.06	.10

1. 전방 각운동량(Hb)

1) 바 넘기에 필요한 전방 각운동량

발구름 동안에 생성된 전방 각운동량의 크기는 평균 104.81(후 - 전)이 되며, 전방 각운동량은 전적으로 발구름 동작에 의해 발생함을 알 수 있다<표 2>. <그림 3>의 total(두꺼운 검은 점선)에서 이러한 특성을 확인 할 수 있다.

발구름 전의 전방 각운동량은 평균 -19.8 (표 2의 Hb)로서 이륙 후에 필요한 방향과 반대 방향의 성분 즉, 후방 각운동량을 갖고 있다. 이는 선행 연구의 -20.8과 잘 일치하고 있으며, 초기의 이 후방 성분은 마지막 스트라이드에서 신체 중심을 낮추고, 구름발을 무게 중심의 진행방향으로 멀리 내딛는 동작으로 인한 것으로 설명되고 있다(Dapena, 1980b).

발구름 후의 전방 각운동량은 평균 84.3으로 선행연구의 61.2 (Dapena, 1980b), 70.9((Dapena 등, 1986), 64.2(Dapena, 1988 (summer))보다 약간 큰 값을 나타내고 있다. S2와 S3는 평균이 각각 72와

1) 각운동량의 단위는 $10^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}$ 으로서 이후 각운동량의 단위는 생략한다.

82로서 큰 차이가 없지만, 피험자 s1은 평균이 102로서 매우 큰 전방 각운동량을 생성시키고 있다. 이렇게 과도한 각운동량을 만드는 것은 역학적으로 비효율적인 동작이며, 그 원인은 발구름에서 전방으로의 선운동량을 적절히 저지(check)하지 못하기 때문이다. S1이 자신의 신장에 비해 다른 피험자보다 도약 최고 높이가 낮은 것이 이를 반증한다.

2) 전방 각운동량 생성을 위한

신체 분절의 역할

<그림 3>에서 볼 수 있듯이 전방 각운동량 생성에 가장 큰 영향을 주는 분절은 구름다리(r_leg, 십자표)와 추진 다리(l_leg, 가는 점선)이다. 구름다리(take-off leg)는 발구름 내내 60 전후의 상당히 큰 각운동량을 유지하고 있어, 바 넘기에 필요한 + 성분의 대부분이 구름다리에 의해 생성됨을 알 수 있다. 추진다리(free leg)는 초기에는 - 60 이상의 성분(바 넘기에 필요한 + 성분의 반대 성분)을 만들지만, 후반으로 가면서 점차 0에 가까워지고 있다. 발구름의 후반에는 머리(Head)와 동체(trunk)가 각각 평균 15.3과 10.7의 + 전방 각운동량을 만들고 있다. 반면에 팔들의 역할은 바에서 먼 팔이 평균 0.18, 가까운 팔은 -3.01을 보이고 있어 팔의 역할은 미미함을 알 수 있다. Dapena(1980b)는 “발구름 단계에서는 하방으로 가해지는 수직력의 크기를 증가시키기 위해 추진다리와 양팔을 상방으로 추진시키는 동작도 발구름의 초기에서는 전방 각운동량과 반대의 각운동량을 발생시키게 되며, 발구름시 양팔 스윙(double arm action)을 쓰는 선수는 한팔 동작(single arm action)을 쓰는 선수에 비해 이륙시에 적은 전방 각운동량을 발생시키게 되므로, 추진 다리를 접고 양팔은 가급적 동체에 가깝게 하여 추진하는 것이 후방 각운동량을 적절히 유지하는데 도움이 된다”고 하였다. <표 3>의 도약 높이와 가까운 팔의 상관계수도 -0.58로서 이를 뒷받침하고 있으나, 팔 동작에 의한 전방 각운동량의 생성은 매우 작으므로, 한팔 추진이나 양팔 추진 모두 별 영향은 없는 것으로 볼 수 있다.

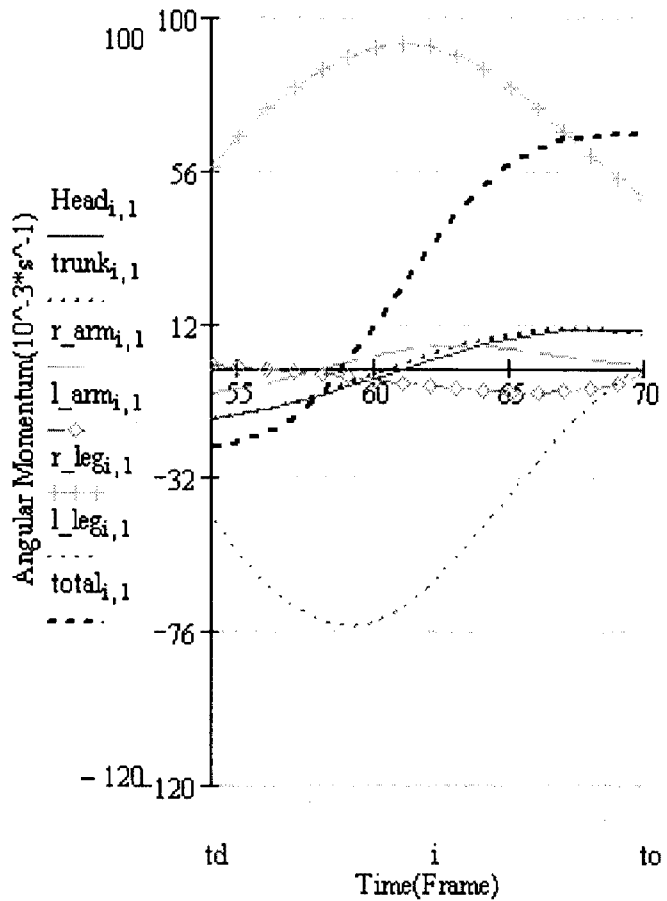


그림 3. 발구름 동안 신체분절 별 전방 각운동량(Hb)의 변화 형태(피험자 s3의 2.29m)

표 3. 이륙 시 신체 분절의 전방 각운동량(Hb). ($10^{-3}/\text{sec}$).

피험자		머리	동체	먼 팔	가까운 팔	발구름 다리	추진 다리	全身
S1	평균	24.04	14.10	-2.91	-1.16	74.39	-8.76	99.70
S2	평균	6.80	8.07	4.08	-5.38	61.32	-0.96	73.92
S3	평균	16.94	10.77	-1.25	-2.11	56.65	-4.04	76.96
	평균	15.35	10.76	0.18	-3.01	63.38	-4.29	82.37
전체	표준편차	7.64	3.19	3.61	2.24	8.88	7.54	13.95
	상관계수	-0.24	-0.08	0.23	-0.58	-0.01	0.26	-0.05

2. 측방 각운동량(Ha)

1) 바 넘기에 필요한 측방 각운동량

발구름 전의 측방 각운동량은 평균 -8.1(표 2의 Ha)로서 이륙 후 필요한 방향의 성분을 갖고 있으며, 선행 연구의 -6.6(Dapena, 1980b)과 유사한 값을 보이고 있다. 피험자별로는 S3가 평균 -22.2를 나타내고 있어 큰 측방 각운동량을 만들고 있으며, S2는 대부분 약간의 + 값을 갖고 있어 차이를 보이고 있다. 마지막 스트라이드에서 곡선주로 내부로 기울어져 있는 몸을 빨리 세울수록 - 값이 크게 나오므로, s3는 이러한 동작을 크게 하는 반면, s2는 기울임을 계속 유지하면서 발구름에 들어가는 동작을 취하고 있음을 알 수 있다.

이륙 후 측방 각운동량의 크기는 평균 -87.3으로서, 선행 연구의 -87.5(Dapena, 1980b), 82.1(Dapena 등 1986; 우측 도움닫기이므로 +값이 된다), 85.0(Dapena, 1988, summer)과 유사한 값을 보이고 있다. 발구름 동안에 생성된 각운동량의 크기는 평균 -79.3(후-전)으로서, 대부분의 측방 각운동량이 발구름 단계에서 생성됨을 알 수 있다.

2) 측방 각운동량 생성을 위한 신체 분절의 역할

<그림 4>에서 볼 수 있듯이 구름다리(r_{leg} , +기호)를 제외한 모든 분절들이 발구름의 전 구간에서 바 넘기에 필요한 - 성분의 각운동량을 만들고 있음을 알 수 있다. 구름다리도 후반에는 점차 수직으로 서게 됨에 따라 다시 - 성분의 각운동량을 만드는데 기여하고 있다. 전방 각운동량과 달리 측방 각운동량은 절대적인 영향을 갖는 분절은 없다. 신체 분절별로는 머리와 추진다리의 역할이 크며, 바에 가까운 팔(l_{arm})은 기여도가 거의 없다.

이륙 시 신체 분절별 각운동량은 추진다리(-32.0), 먼 팔(-24.0), 머리(-23.9), 몸통(-15.7)의 순으로 크다<표 4>. 이륙 시 각운동량과 도약 높이와의 상관은 먼 팔이 -0.57, 추진다리가 -0.51의 부적 상관을 보이고 있는데, 이는 도약 높이가 높아질수록 추진다리와 바에서 먼 팔을 더 강력하게 추진하기 때문인 것으로 해석된다.

표 4. 이륙 시 신체 분절별 측방 각운동량(Ha). ($10^{-3}/\text{sec}$).

피험자		머리	동체	먼팔	가까운 팔	발구름 다리	추진다리	全身
S1	평균	-17.12	-13.35	-17.79	-13.01	6.86	-38.09	-92.50
S2	평균	-30.90	-18.32	-27.25	-2.50	-5.91	-27.35	-112.20
S3	평균	-22.43	-15.09	-25.78	-2.21	0.53	-31.97	-96.96
	평균	-23.93	-15.75	-24.02	-5.40	0.04	-32.07	-101.10
전체	표준편차	6.19	2.94	4.64	5.25	9.26	7.13	11.26
	상관계수	-0.06	0.21	-0.57	-0.04	-0.30	-0.05	-0.51

피험자 s1은 이륙 시 발구름 다리의 각운동량이 +6.8로서 다른 선수들과 반대의 형태를 보이고 있는데, 이는 잘못된 발구름 동작을 반증하는 것이다. 그 이유는 곡선주로 내부로 기울어져 있던 몸이 발구름 동안 바로 서게 되면, 발구름 후반의 구름다리는 반드시 좌측 방향으로의 회전을 나타내는 - 성분을 가져야 하기 때문이다. 이 피험자는 앞에서 지나친 전방 각운동량을 보여주고 있는데, 이는 부적절한 구름다리의 동작으로 인해 발구름의 효율을 크게 저하시키고 있음을 보여주는 것이다.

3. 섬머셀팅 각운동량(Hs)

섬머셀팅 각운동량은 전방 각운동량과 측방 각운동량의 벡터 합으로써 그 크기와 방향이 결정된다. 이륙 후 섬머셀팅 각운동량의 크기는 평균 122.7이었으며, 그 방향은 수평면에서

바와 5도의 각도를 갖는 방향이 되고 있다. 이 값은 선행 연구의 평균 107.1(Dapena, 1988(summer))보다 다소 큰데, 그 이유는 앞에서 본 전방과 측방 각운동량이 크기 때문이다.

피험자별 섬머셀팅 각운동량 크기의 평균은 S1이 129.5(측방: -79, 전방 102)로 가장 크며, S2는

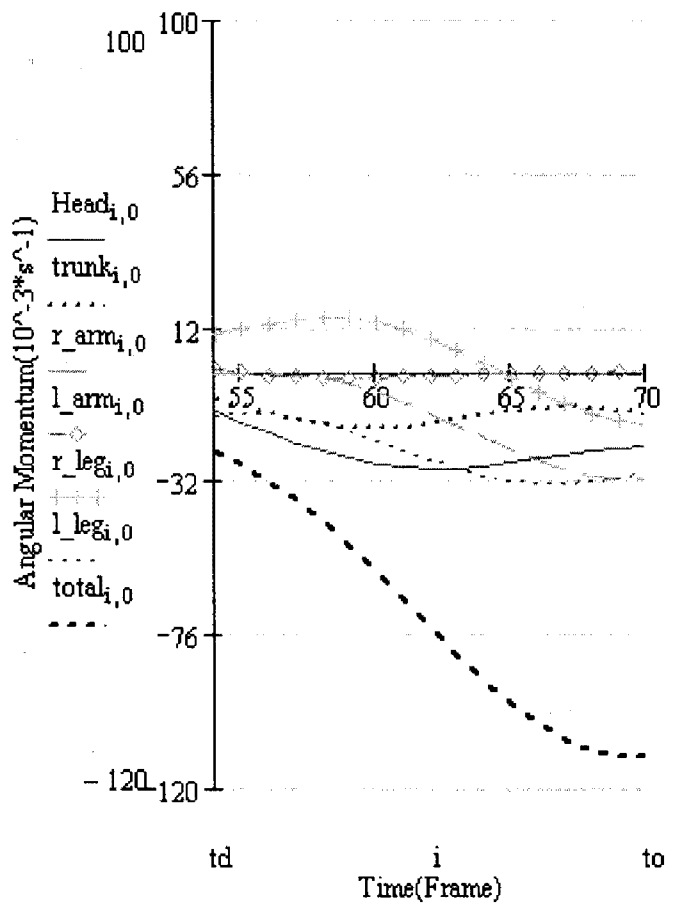


그림 4. 발구름 동안 신체분절 별 측방 각운동량(Ha)의 변화 형태(피험자 s3의 2.29m)

123.3(측방:-98, 전방 72), S3는 116.6(측방:-82, 전방 82)의 크기를 갖고 있으며, 전술한 바와 같이 피험자 s1은 상이한 특성을 보여주고 있다. Dapena(1988, summer)는 동체의 후경각과 측경각은 각각 전방 각운동량 및 측방 각운동량의 크기와 상관이 있으며, 구름발 착지 시에 동체의 후경각과 내경각이 작음(수평면으로부터의 각을 측정했으므로 각이 작으면 기울임이 크다) 선수는 이륙시에 큰 수직 속도를 갖지만, 전방과 측방의 각운동량은 적게 생성되는 경향이 있다고 하였다.

4. 트위스팅 각운동량(Hz)

1) 바 넘기에 필요한 트위스팅 각운동량

트위스팅 각운동량(Hz)은 구름발 착지 전에 평균 -10.5, 발구름 후에는 평균 -43.6으로서 선수들은 발구름 전에 이륙 후 필요한 성분의 24%만을 갖고 있었다<표 2>. 따라서, 이륙 시에 가용한 트위스팅 각 운동량의 76%는 발구름 단계에서 생성되어야 했다. Dapena (1980b)는 발구름 단계에서 생성되는 트위스팅 각운동량은 구름발 착지 시에 생성되어 있는 트위스팅 각 운동량의 2배 이상이었다고 보고하고 있으며, 바 넘기의 체공기에서는 평균 44.7(Dapena, 1986, ; 오른발 발구름이므로 + 값), 50.7 (Dapena, 1988(summer))이었다고 보고하고 있어, 본 연구의 피험자들과 유사하거나 다소 큰 트위스팅 각운동량을 발생시키고 있다. Dapena(1997)는 선수들은 부족한 트위스팅 각운동량을 캐팅(cutting; 각운동의 작용과 반작용을 이용하여 신체의 장축에 대한 비틀기를 수행하는 동작)으로 대체하고 있으며, 캐팅에 의한 각운동량의 크기는 이륙 시 갖고 있는 트위스팅 각운동량의 크기와 같다고 보고하고 있어, 트위스팅 각운동량이 다소 작은 선수는 캐팅 동작을 더 이용하는 것으로 판단된다.

2) 트위스팅 각운동량 생성을 위한 신체 분절의 역할

<그림 5>에서 알 수 있듯이 트위스팅 각운동량의 생성을 주도하는 신체분절은 추진다리(Leg, 가는 점선)이며, 발구름 전체에 걸쳐 큰 역할을 하고 있다. 추진다리가 큰 -Hz 성분의 변화를 갖는 것은 발구름 동안 추진다리는 계속적으로 동체의 수직축을 향한 수평내전을 하기 때문이다<그림 1 참조>. 동체와 머리도 발구름 내내 작지만 바람직한 방향인 - 방향의 각운동량을 만들어 내고 있다.

선수들은 발구름 준비 동작에서의 바에 대한 어깨의 각도가 발구름 동작에 상당한 영향을 준다고 말하고 있어, 몸의 비틀림을 조절하는 동체의 역할을 고려해 보아야 한다. 어깨와 골반의 동작에 대해 Reid(1986)는 “발구름 준비 단계에서 골반은 지지발에 대해 해부학적 자세를 유지하려 하는 반면, 어깨는 바에 대해 바깥쪽으로 회전(cocked)하게 되며, 이러한 동작은 동체의 흉요(胸腰) 부분에 상호 반대의 큰 토크를 발생시키게 된다”고 기술하고 있다. 또 Jacoby(1987)는 “구름발 착지 시에 골반은 바의 지주 쪽을 향하게 하고 어깨는 바에 대해 바깥쪽으로 멀리 회전시키는 동작 즉, 어깨와 골반을 분리(separate)시키는 동작은 동체의 근육들이 신전되게 함으로써, 발구름 시에 등이 바를 향

하도록 하는 회전을 용이하게 한다”고 하였다.

구름다리(r_leg, 십자선)는 발구름 전체에 걸쳐 + 10 전후의 반대 방향 성분을 만들어 내고 있다. 먼 팔(r-arm, 대시 선)은 구름다리와 마찬가지로 초기에 +10 전후의 값을 갖지만, 후반으로 가면서 등이 바 쪽을 향하게 됨에 따라 - 쪽으로 방향이 바뀌고 있다. 발구름 동작의 속성 상 구름다리의 + 성분은 통제할 수 없지만, 먼 팔의 동작은 어느 정도 통제가 가능하므로, 등을 바 쪽으로 돌리는데 어려움을 겪는 선수는 먼 팔의 동작을 개선시킬 여지가 있다.

이륙 시의 각운동량은 추진다리가 전체의 76.9%인 -30.3을 가지고 있으며, 다음으로 머리(-7.6, 18.6%), 동체(-7.4, 13%)의 순이다<표 5>. 도약 높이와 이륙 시 추진다리의 트위스팅 각운동량과의 상관은 -0.42로 약한 상관이 나왔는데, 이는 도약의 높이가 증가해도 추진다리를 이용한 트위스팅 각운동량의 생성은 비례하여 커지지 않음을 보여주는 것이다.

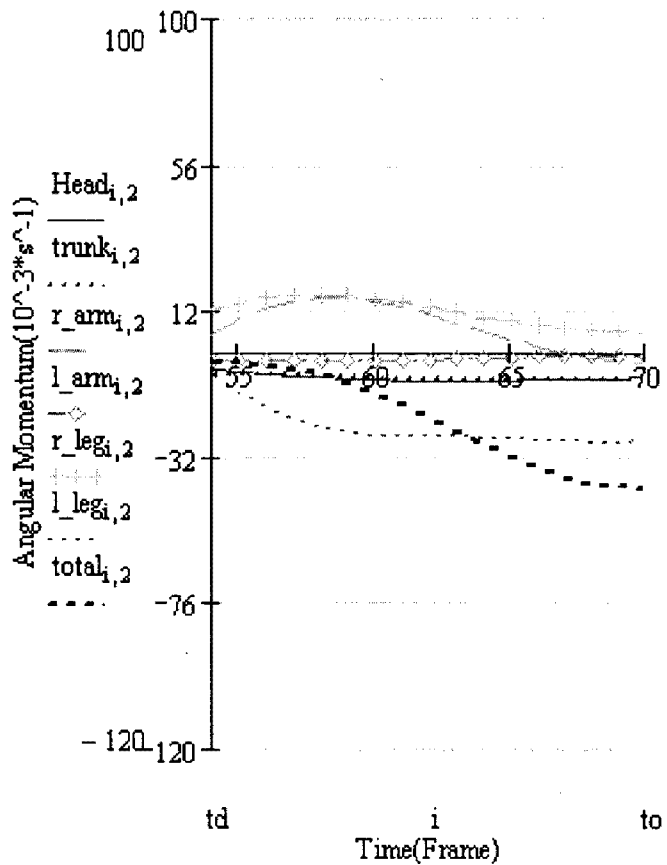


그림 5. 발구름 동안 신체분절 별 트위스팅 각운동량(Hz)의 변화 형태(피험자 s3의 2.29m)

표 5. 이륙 시 신체 분절별 Z축에 대한 각운동량(Hz). (10⁻³/sec).

피험자		머리	동체	먼 팔	가까운 팔	발구름 다리	추진 다리	全身
S1	평균	-4.74	-5.40	-2.45	6.11	3.49	-33.55	-36.52
S2	평균	-9.15	-8.35	-2.61	0.17	1.97	-31.08	-49.04
S3	평균	-8.57	-8.03	-3.85	-0.41	-0.10	-26.97	-47.93
	평균	-7.68	-7.39	-3.00	1.66	1.67	-30.32	-45.07
전체	표준편차	2.46	1.69	2.41	3.02	5.27	4.13	8.30
	상관계수	0.02	-0.25	-0.35	0.07	0.64	-0.42	0.08

5. 도약 높이와 각운동량의 크기와의 상관

첫 번째 연구문제와 관련된 또 하나의 관심 사항인 '발구름 시에 발생하는 각 운동량은 도약 높이가 높아질수록 더 커지는가, 아니면 일정한가' 하는 문제는 일정한 것으로 볼 수 있다. 도약 높이와 각운동량과의 관계를 살펴보면(표 2 하단의 상관계수 r), 각운동량의 모든 성분들은 도약의 높이와 유의한 상관이 없었다($r < 0.6$). 이러한 결과는 각운동량을 만들기 위해서는 발구름을 할 때 무게 중심에 대한 편심력을 작용시키는 만큼 수직 추진력을 잃게 되므로(Ecker, 1976; Doherty, 1980; Hay, 1985), 바를 넘어가는데 필요한 최소한의 각운동량만을 생성함으로써 수직력의 손실을 최소화하고 있음을 뜻하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 도약의 높이가 높아져도 바를 넘어가는데 더 큰 각운동량이 필요한 것은 아니라고 결론지을 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 포스베리 높이뛰기에서 선수가 바(bar)를 넘어가는데 필요한 비틀기(twisting)와 공중회전(somersault) 각운동량의 크기와 특성을 밝히고, 발구름 단계에서 이 각운동량을 만드는 신체 분절들의 역할을 규명하기 위해 수행되었다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 신체를 앞으로 회전시키는 전방 각운동량은 모두 발구름 단계에서 생성되었다. 전방 각운동량의 생성에 가장 큰 영향을 주는 신체 분절을 구름다리(take-off leg)였으며, 추진다리(free leg)는 반대 방향의 큰 성분을 발생시켰다.
2. 왼편 도움닫기 선수의 경우 신체를 좌측으로 회전시키는 측방 각운동량은 발구름 단계 이전에 필요한 성분의 일부를 갖고 있었다. 측방 각운동량의 생성에 기여도가 큰 분절은 머리와 추진다리였으며, 구름다리는 필요한 성분의 반대방향 각운동량을 발생시켰다.
3. 선수의 등이 바(bar) 쪽으로 회전하게 하는 트위스팅(twisting) 각운동량은 발구름 단계 이전에 필요한 성분의 일부를 갖고 있었다. 트위스팅 각운동량의 생성에 기여도가 가장 큰 분절은 추진다리였으며, 머리와 동체는 작지만 발구름 내내 바람직한 방향으로의 각운동량을 생성하였다.
4. 발구름 시 만들어지는 각운동량의 크기는 도약 높이에 따라 증가하지 않았다.
5. 신체 조건에 비해 기록이 가장 저조한 선수의 경우, 지나치게 큰 전방과 측방 각운동량을 만들었으며, 다른 선수들과 다른 형태의 각운동량 생성 형태를 보였다.

참고문헌

- 성 낙준(1991). 포스배리 높이뛰기의 발구름에 대한 운동역학적 분석. 서울대학교 대학원 박사학위 청구논문.
- 성 낙준(2003). 높이뛰기의 도약 높이를 증가시키는 역학적 원리와 동작. *한국 운동역학회지*, 13(3).
- 성 낙준, 권 영후, 신 인식, 진 성태, 김 의환, 장 윤진, 이 계산, 최 규정 (1987). 3차원 영상 분석 시스템 개발, *스포츠 과학 종합 보고서*, 대한 체육회 스포츠 과학연구소.
- 성 낙준, 정 철수, 김 용기 (1990). 높이뛰기의 발구름과 공중 동작에 관한 운동 역학적 분석, *스포츠 과학 종합 보고서*, 한국 체육 과학 연구원.
- Ae, M.(1990). 走高跳および走幅跳の踏切における 身體各部の使い方・貢献度[주고도와 주폭도의 답절시 신체 각부의 공헌도]. *Japanese Journal of Sports Science*, 9(3),130-136.
- Ae, M., Sakatani, Y., Yokoi, T., Hashihara, Y., & Shibukawa, K.(1986). Biomechanical analysis of the preparatory motion for take-off in the Fosbury flop. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2(2), 66-77.
- Ae, M., Shibukawa, K., Tada,S., & Hashihara, Y. (1983). A biomechanical analysis of the segmental contribution to the take-off of the one-leg running jump for height. *Biomechanics VIII-B*, 4B, 737-745.
- Dapena J. (1997). Contributions of Angular Momentum and Catting to the Twist Rotation in High Jumping. *Journal of Applied Biomechanics*, 13, 239-253.
- Dapena J., & Chung, C.S. (1988). Vertical and radial motion of the body during the take-off phase of high jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20(2), 290-302.
- Dapena, J. (1978). A method to determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity, *Journal of Biomechanics*, 11, 251-256.
- Dapena, J. (1980a). Mechanics of translations in the fosbury flop. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1), 37-44.
- Dapena, J. (1980b). Mechanics of rotation in the Fosbury flop. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1), 45-53.
- 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, Summer). Biomechanical analysis of the Fosbury Flop, Part I, *Track technique*,

104, 3307-3317.

- Dapena, J., Feltner, M., & Bahamonde, R.(1986). *Biomechanical Analysis of High Jump #5 (Men)*, Report for scientific services project(USOC/TAC).
- Doherty, K. (1980). *Track and Field Omnibook* , New York, Tafnews Press.
- Ecker, T. (1976). *Track and field - technique through dynamics*. Tafnews Press, Los Altos, Ca.
- Hay, J.G. (1985). *The Biomechanics of Sports Techniques*(3rd ed.): Englewood cliffs, N.J.: prentice Hall, Inc.
- Jacoby, E. (1987,Winter). A guide to the Flop high jump approach. *Track & Field Quarterly Review*, 87(4), 39-45.
- Kwon, Y.H., & Shin, I.S. (1990). 3-D analysis of Yurchenko Vaults Performed by Female Gymnasts During the 1988 Seoul Olympic Games, *International Journal of Sport Biomechanics*, 6, 157-176.
- Plagenhoef, S., Evans, F.G., & Abdelnour, T. (1983). Anatomical data for analyzing human motion, *Research Quarterly for Exercise and Sports*, 54(2), 169-178.
- Reid, P. (1986). Approach and take-off for the back lay-out high jump. *NSCA journal*, 8(1), 5-9.
- whisette, C.E. (1963). *Some dynamic response characteristics of weightless man*. AMRL Technical Report 63-18. Wright-Patterson air forces Base. OH.

투 고 일 : 10월 28일

심 사 일 : 11월 4일

심사완료일 : 12월 3일