

Motion Analysis of Kolman Technique by Korean Top Gymnasts on Horizontal Bar

국내 우수선수들의 철봉 Kolman 기술 동작 분석

Kyu-Chan Lim, Nam-Koo Lee

School of Sport Science, University of Ulsan, Ulsan, South Korea

Received : 05 November 2021

Revised : 09 December 2021

Accepted : 09 December 2021

Objective: The aim of this study was to analyze the pattern of Kolman technique by five Korean top gymnasts including the three national athletes on horizontal bar.

Method: Two digital high-speed camcorders were used with 90 frames/sec and their Kolman motions were filmed in sports science secondary school gymnasium at U city. After the kinematic and kinetic variables were carried out by Kwon3D 3.1 motion package during the whole phase, the optimized release motion was investigated by simulating the body COG path during the aerial phase.

Results: Firstly, it was revealed that the average changes of hip, shoulder joint angle were 84 deg, 53 deg respectively during the functional sub-phase and the average swing phaseal time was 1.21 s. Secondly, it was revealed that the average body COG positions and velocities (Y, Z) at release were -0.65 m, 0.48 m, 1.65 m/s, 3.97 m/s respectively and the average release angle, peak height and flight time were 67 deg, 1.29 m, 0.79 s respectively. Thirdly, it was revealed that the directions of somersault of whole and lower body, tilt of lower body were counterclockwise, whereas the directions of tilt of whole body, twist of whole and lower body were clockwise at the ready for re-grasp. Lastly, it was revealed that the body COG paths were different from each other during the aerial phase followed by the different body COG velocities.

Conclusion: Korean gymnasts of this study controlled their motions well in terms of the timing of hip · shoulder joint, body position, body angular momentum especially during the functional sub-phase, but their motions were different during the aerial phase. Nonetheless most of them made the adequate body position at the instant of re-grasp. It would be suggested that Korean gymnasts except S3 should increase the vertical velocity.

Keywords: Kolman technique, Horizontal bar, Men's gymnastics, Giant swing backward

Corresponding Author

Kyu-Chan Lim

School of Sport Science, University of Ulsan, Daehakro 93, Nam-gu, Ulsan, 44610, South Korea

Email : kclim@ulsan.ac.kr

INTRODUCTION

1. 연구의 필요성 및 목적

철봉 Kolman 기술은 1990년 유럽 체조 선수권대회에서 슬로베니아 체조 선수인 Alojz Kolman에 의해 처음 시도되었다(Cuk, 1995). 비행 요소(flight elements)가 포함된 기술(F.I.G., 2017)로서, 철봉에서 흔들기를 한 후, 뒤돌아 오르면서 바를 놓고, 공중으로 한 바퀴 회전(somersault)하면서 1가로 회전(twist)하여 다시 바를 잡는 기술로서(Song & Park, 2011; Back, Park & Yoon, 2009; Park, 2007; Cuk, 1995; Shen & Tsai, 2005; Youtube, 2016) giant circle 방향은 backward로 Kovacs와 같다(Lim, 2020; Yeadon & Hiley, 2000).

모든 비행 요소를 포함하는 철봉 기술은 바 놓기와 바 되잡기에서 승패가 가려지므로(Irwin, Exell, Manning & Kerwin, 2017) 대차 회전(giant circle)에 의한 흔들기와 투사 위치 및 속도 그리고 각운동량이

매우 중요하다(Arampatzis & Brüggemann, 1999). 선수들은 가속 대차 후 바 하단에 근접할 때 어깨 관절과 엉덩 관절의 움직임과 타이밍을 조절함으로써 하강 구간에서의 각운동량 획득과 상승 구간에서의 손실에 대한 균형을 적절히 제어해야 한다(Hiley, Yeadon & Buxton, 2007). Irwin과 Kerwin (2005)은 이러한 어깨 관절과 엉덩 관절의 움직임이 이루어지는 구간을 기능적 구간(functional phase)이라 정의하였고, 수행하는 기술에 따라 어깨 관절과 엉덩 관절의 움직임은 서로 다르다고 주장하였다(Irwin et al., 2017).

또 Song & Park (2011)은 추기기(몸이 바에 도립된 상태에서 흔들기를 시작한 후 엉덩 관절이 과 신전되기까지의 구간)에서 신체가 빠른 하강을 해야 하고, 바를 통과한 후 상승 구간에서 신체 중심을 전 방향으로 충분히 이동하여 높은 위치에서 몸이 투사되어야 한다고 하였다. 이러한 전 방향에서 상방향으로의 전환 시점이 잘못되면 되잡기 위치가 멀어져 바 잡기가 어려워진다고 밝혔다. Back 등 (2009)은 흔들기에서 깊은 추기기 동작, 즉 바에 도립한 후 흔들러 내릴 때 엉덩 관

절의 과 신전 동작과 흔들기가 마무리된 후 동체 회전을 이용하여 신체 중심을 높여 몸을 투사하는 동작을 매우 중요하게 강조하였고, 공중에서 신체가 지면과 수직이 되는 시점이 빠를수록 좋다고 분석하였다. Park (2007)은 Kolman 동작을 운동학적으로 분석하면서 흔들기의 큰 원운동과 투사 직전의 타이밍을 늦춘 결과, 투사 순간의 신체 중심의 위치가 높아져서 공중에서의 비틀기 및 회전이 향상되어 Kolman 기술의 운동수행력이 좋아졌다고 밝힌 바 있다. 또 Shen & Tsai (2005)는 성공적인 Kolman 기술을 발휘하려면 흔들기 후 바의 최저점을 통과하는 순간에 바를 너무 일찍 잡아당기면 안 된다고 제시하면서, 바의 장력이 다시 커지는 순간에 수평 가속도가 너무 증가되면 투사 후 공중에서 바를 되잡을 때 나쁜 영향을 미친다고 밝혔다.

이처럼 흔들기 후 바를 놓고 공중 동작을 수행한 후 바를 되잡는 Kolman 기술 점수는 0.5로서 동일한 요소가 포함된 Kovacs 기술의 0.4보다 높게 평가하고 있다(F.I.G., 2017). 이는 공중에서 뒤 돌기로 1회전하는 Kovacs에 비해 Kolman 기술에서는 비틀기가 추가되었기 때문이다. Kovacs 기술은 전방 회전(somersault)만 수행하므로 기술의 복잡성은 없으나 바를 되잡을 때까지 바를 쳐다볼 시간이 부족하기 때문에 선수들은 가로 회전(twist)을 하더라도 바를 바라보는 시간적 여유가 충분한 Kolman 기술을 더 선호하고 있어, 최근의 국내 선수들의 Kolman 기술의 성공률은 과거에 비해 매우 높은 편이고, 우수 선수들은 Kolman 기술을 보편적으로 수행하고 있다.

국내 선행 연구인 '체조 철봉 콜만 동작 기술 수행능력 향상을 위한 운동학적 요인 분석'(Song & Park, 2011), '체조 철봉 콜만 기술 동작의 훈련프로그램 적용 및 향상도 평가'(Back et al., 2009) 그리고 '철봉 운동 Kolman 동작의 완성도 평가를 위한 운동학적 분석'(Park, 2007)에서는 1명 또는 2명을 대상으로 전구간에서의 관절각 변화와 투사 순간의 신체 중심의 속도와 위치 등을 분석하였으나, Kolman 기술에 큰 영향을 미치는 엉덩 관절의 과 신전에서부터 투사 직전까지의 관절 움직임, 투사 직전의 각운동량 그리고 되잡기 준비 구간에서의 전신의 움직임과 공중에서의 신체 중심의 이동 궤적에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 또한 Shen & Tsai (2005)는 흔들기 하방 구간에서 신체 중심이 가장 낮은 위치를 지날 때 신체 중심의 수평 위치가 짧고, 이 순간 직후에 신체 중심의 수평 가속도가 작아야 Kolman을 성공할 수 있다고 분석하였으므로 이에 대한 추가적인 분석이 필요해 보인다. 또 한정적인 체공 시간 안에서 투사 순간의 신체 중심의 위치와 되잡기 순간의 신체 중심의 위치 간의 상관도 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 국내 우수선수들의 Kolman 기술을 분석하는 데 목적을 두고, 이를 규명하기 위해 구간별 시간, 흔들기 구간에서의 엉덩 관절각과 어깨 관절각, 전신의 위치와 각운동량, 체공 구간에서의 신체 중심의 위치와 관계 및 투사 속도, 되잡기 순간에서의 하지 및 전신의 각운동량, 무릎 관절각과 구심 속도, 그리고 체공 구간에서의 최적화된 신체 중심의 이동 궤적을 분석하였다.

METHOD

1. 연구대상자

2021. 9.에 U시에 있는 스포츠과학고등학교 실내체조장에서 Kolman 기술을 수행할 수 있는 국가 대표 3명과 실업 팀 선수 2명 총 5명을

연구대상자로 선정하였다. 키와 한 팔의 길이 그리고 체 질량은 각각 1.67 ± 0.03 m, 0.56 ± 0.01 m, 62 ± 3 kg이고, 나이와 선수 경력의 평균은 각각 27 ± 2 , 18 ± 2 year이며, 촬영 후 연구대상자에게 연구의 취지를 설명하였고 개인정보 활용에 대한 서면 동의를 받았다.

2. 실험 및 측정

Kolman 기술을 촬영하기 위해 2대의 캠코더(digital high-speed camcorder; VFC-300), 40 cm 간격으로 통제점을 부착한 5.6 m 높이의 통제점 막대 4대(4.52 m \times 5.28 m \times 5.60 m), 그리고 각도 측정기(SOKKIA EZS21S)가 각각 사용되었다. 막대 당 14개씩 총 56개의 통제점을 각도측정기로 측정하고 촬영하였으며, 촬영 속도를 90 frames/s로 세팅하였다. 관성 좌표계(Cartesian coordinate)의 원점은 바의 중간 지점으로 설정하고, 바의 왼쪽 끝으로의 연결 벡터를 X축으로, 몸이 투사되는 수평 방향을 Y축으로 설정하였으며, 수직축을 Z축으로 설정하였다. 선수들은 충분한 워밍업을 한 후 2번의 Kolman 기술을 실패 없이 성공하였는데 바를 되잡은 후에도 후속 연기를 수행하게 하였다. Kolman 동작을 촬영한 후, 선수들이 2번의 수행 중 좋았다고 판단한 동작을 분석대상으로 선정하였다.

3. 자료 처리

Kwon3D 3.1 동작 분석 프로그램을 사용하여 바에 도립된 자세를 취하기 5 frame 전부터 개시하여 공중 자세 후 바 되잡기를 완료한 후 5 frame까지의 18개 관절점(body landmark)를 좌표화하고, 직선변환방식(DLT; Abdel-Aziz & Karara, 1971)으로 위치 좌표를 산출하였으며, 신체 분절 모수치(BSP)는 Hanavan-Kwon 자료를 사용하였다(Visol, 2005). 그리고 자료를 평활화(smoothing)할 때의 차단 주파수(cutoff frequency)는 8.0 Hz로 하였으며, 사후 보간(post-interpolation)은 100 Hz로 하였다.

본 연구의 구간을 흔들기 구간(SP; swing phase)과 체공 구간(AP; aerial phase)으로 구분하고, 흔들기 구간을 바에 도립된 순간(HS; handstand)부터 엉덩 관절이 젖혀지는 순간(HE; hyperextension), 신체 중심의 높이가 최하단인 순간(LP; lowest position), 엉덩 관절의 굽힘 속도가 최대인 순간(MF; maximum flexion), 늘어난 바가 원 위치하는 순간(OP; original position), 그리고 몸이 공중으로 투사되는 순간(RL; release)까지로 설정하였다. 또 체공 구간을 몸이 공중으로 투사되는 순간(RL; release)부터 신체 중심의 높이가 최정점인 순간(PH; peak height), 머리의 무게 중심 Z축 속도가 부적으로 증가하다가 거의 일정하게 된 순간(RR; ready for re-grasp), 그리고 바를 오른손으로 되잡기를 하는 순간(RG; re-grasp)까지로 설정하였다. 특히 흔들기 구간에서 엉덩 관절이 젖혀지는 순간(HE)부터 늘어난 바가 원 위치하는 순간(OP)까지를 기능적 구간(FS; functional sub-phase)로 설정하였다(Figure 1).

모든 순간과 구간에서의 시간과 신체 중심의 위치를 구하였고, 투사 속도는 투사체 운동방정식에 대입하여 재 산출하고, 신체 중심의 투사 각을 계산하였다. 되잡기 순간의 신체 중심의 위치와 바 간의 거리의 변화율로 구심 속도(radial velocity)를 계산하였고(Hiley & Yeadon, 2016), 흔들기 구간에서의 엉덩 관절각(몸통 벡터와 왼 윗다리 벡터가 이루는 각), 어깨 관절각(왼 윗팔 벡터와 몸통 벡터가 이루는 각), 엉덩 관

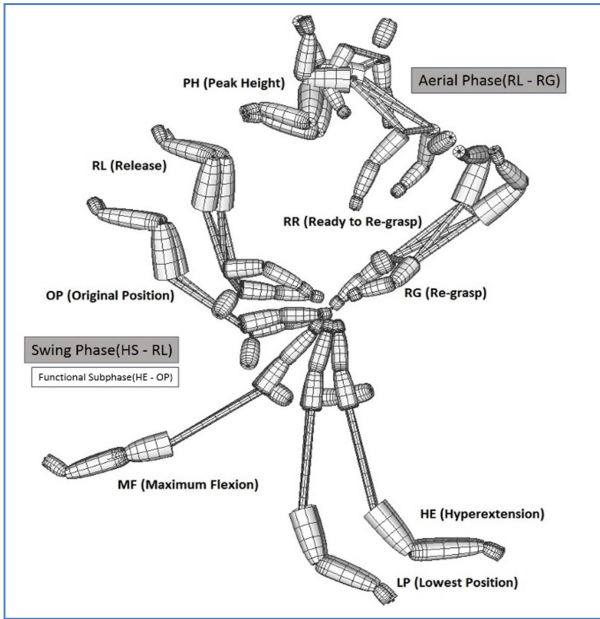


Figure 1. Consecutive instants of Kolman technique

절 각속도 및 체공 구간에서의 무릎 관절각(원 윗다리 벡터와 원 아랫다리 벡터가 이루는 각)을 구하였다. 각운동량은 질량과 신장의 제곱으로 나누어 표준화하였고, 그래프의 시간을 100%로 표준화하였다. 그리고 선행 연구와 본 연구의 결과에서 나타난 체공 시간들의 평균값을 고정시키고 투사 위치와 투사 속도를 패러미터(parameter)로 사용하여 체공 구간에서의 신체 중심의 궤적을 최적화하였다. 이 중 구심 속도가 1.4 m/s보다 크고, 신체 중심과 바 간의 거리가 0.84 m 이상인 되잡기 위치가 적절한 상위 4개의 자료를 평균하여 이를 최적의 공중 궤적으로 제시하였다.

4. 통계 처리

본 연구의 변인들을 Excel 2016을 이용하여 기술 통계(descriptive statistics)하였고, 투사 순간과 되잡기 순간의 신체 중심의 위치 간의

관계를 유의수준 .05에서 적률 상관 분석하였다.

RESULTS

1. 흔들기 구간

흔들기의 기능적 구간에서의 엉덩 관절각과 어깨 관절각, 최하단(LP)에서의 신체 중심의 Y축 위치, 엉덩 관절의 젖혀진 순간(HE)과 바의 원 위치 순간(OP)에서의 전신의 각운동량 합 성분 그리고 흔들기 구간의 누적 시간은 (Table 1)과 같이 나타났고, 신체 중심의 이동 궤적은 (Figure 2)와 같이 나타났다.

(Table 1)과 같이 HE에서의 엉덩 관절각과 어깨 관절각은 각각 208 ±3 deg, 184±4 deg로 나타났고 OP에서는 123±5 deg, 131±4 deg로 각각 감소하였는데, 그 변화량은 각각 84 deg와 53 deg로 산출되었다. 엉덩 관절각의 변화량에서 S3가 72 deg로 가장 작았고, 어깨 관절각

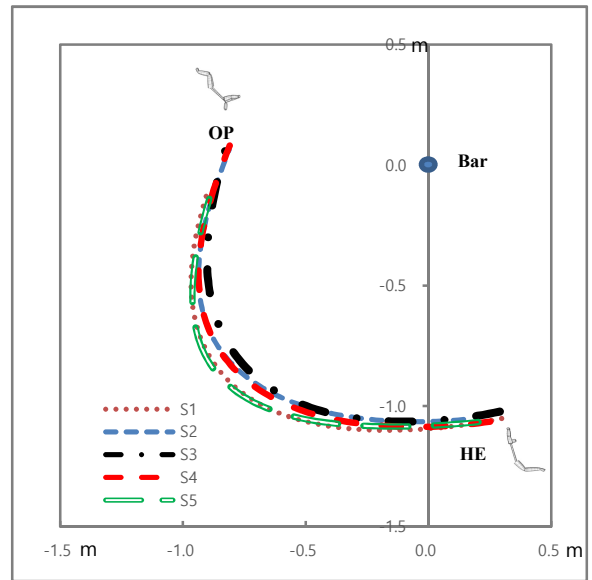


Figure 2. COG path of body during FS

Table 1. Descriptive statistics about kinematic and kinetic variables during the swing phase

	Hip angle (deg)				Shoulder angle (deg)				PY (m)	AM (s ⁻¹)		Cumulative time (s)				
	HE	LP	MF	OP	HE	LP	MF	OP	LP	HE	OP	HE	LP	MF	OP	RL
S1	210	206	165	122	181	180	163	134	-0.19	3.9	2.9	0.74	0.81	0.95	1.10	1.21
S2	212	212	181	121	183	183	166	126	-0.07	3.9	2.8	0.76	0.79	0.92	1.12	1.21
S3	205	201	163	133	181	181	157	131	-0.11	4.4	3.1	0.72	0.78	0.93	1.10	1.18
S4	205	203	175	120	185	183	162	128	-0.04	3.8	3.0	0.74	0.78	0.91	1.11	1.19
S5	207	204	172	121	191	190	168	136	-0.15	3.6	2.9	0.76	0.81	0.94	1.11	1.26
M	208	205	171	123	184	183	163	131	-0.11	3.9	2.9	0.74	0.79	0.93	1.11	1.21
SD	3	4	7	5	4	3	4	4	0.05	0.3	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	.03

PY = position (Y) of body, AM = angular momentum (R) of body

의 변화량에서는 S1이 47 deg로 가장 작았다. LP에서의 신체 중심의 Y축 위치는 -0.11 ± 0.05 m로 나타났고, S4가 -0.04 m로 가장 작았다. 기능적 구간의 HE와 OP에서의 전신의 각운동량(R)은 각각 3.9 ± 0.3 s⁻¹, 투사 직전인 OP에서의 각운동량은 2.9 ± 0.1 s⁻¹로 나타났고, S3는 각각 4.4 s⁻¹, 3.07 s⁻¹로 가장 컸다. 흔들기 구간의 전체 소요시간은 1.21 ± 0.03 s로 나타났고, 기능적 구간의 소요시간은 0.36 s로 산출되었다. S3의 흔들기 소요시간은 1.18 s로 가장 작았으나, 기능적 구간의 소요시간은 0.38 s로 가장 컸다.

(Figure 2)의 기능적 구간에서의 신체 중심의 이동 궤적을 보면 선수들마다 다른 경로를 보였다. 평균 신장을 가지고 있는 S3의 경우 LP에서의 신체 중심의 Y축 위치가 -0.11 m로 상대적으로 크게 나타났다. 이 시점을 지난 후 상승 구간에서의 신체 중심의 이동은 바에 가깝게 만들어지고 있음을 알 수 있고, S5의 경우 신장이 커서(1.73 m) 신체 중심이 낮고 길게 움직인 것을 알 수 있었다.

2. 투사 순간과 체공 구간

체공 구간에서의 신체 중심의 위치와 누적 시간, 투사 순간(RL)에서의 신체 중심의 속도(투사 속도) 및 투사각은 (Table 2)와 같이 나타났고, 투사 순간과 되잡기 순간(RG)에서의 신체 중심의 위치는 (Figure 3)과 같이 나타냈다.

(Table 2)와 같이 RL에서의 신체 중심의 Y, Z축 위치는 각각 -0.65 ± 0.02 m, 0.48 ± 0.04 m로 나타났고, PH에서의 신체 중심의 Y, Z축 위치는 각각 0.05 ± 0.04 m, 1.29 ± 0.06 m로 나타났으며, RG에서의 신체 중심의 Y, Z축 위치는 각각 0.68 ± 0.05 m, 0.64 ± 0.02 m로 나타났다. S3의 경우 RL에서의 신체 중심의 Y축 위치가 -0.68 m로 가장 크고, PH에서의 신체 중심의 Z축 위치도 1.39 m로 가장 큰 것으로 나타났다. RL에서의 신체 중심의 Y, Z축 속도는 각각 1.65 ± 0.07 m/s, 3.97 ± 0.14 m/s로 나타났으며, 투사각은 67 ± 1 deg로 나타났다. S3의 경우 투사 속도(R)가 4.5 m/s로 가장 크고, 투사 각도도 70 deg로 가장 큰 것으로 나타났다. 체공 시간은 0.79 ± 0.03 s로 나타났고, S3의 경우 체공 시간과 전구간의 소요시간이 각각 0.84 s, 2.02 s로 가장 큰 것으로 나타났다.

(Figure 3)과 같이 S5를 제외하고 선수 별 신체 중심 투사 위치는

서로 비슷한 것으로 나타났고, 되잡기 위치는 약간의 변동성이 있는 것으로 나타났다. 투사 순간의 신체 중심 Y, Z축 위치와 되잡기 순간의 Y, Z축 위치 간에 상관분석을 한 결과 모두 상관성이 낮게 나타났으나($p > .05$), 투사 순간의 Z축 위치와 되잡기 순간의 Y, Z축 위치 간에는 낮은 부적 상관($r = -.42, -.43$)을 보였다.

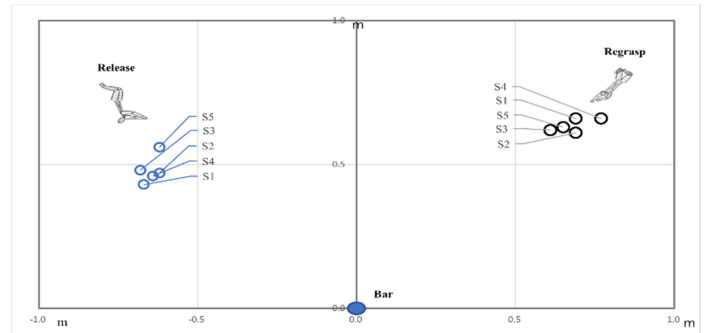


Figure 3. Release and re-grasp position of body

3. 되잡기 준비 및 되잡기 순간

되잡기 준비 순간(RR)에서의 하지와 전신의 각운동량, 무릎 관절각 그리고 바 되잡기 순간(RG)에서의 신체 중심의 구심 속도는 (Table 3)과 같이 나타냈다.

(Table 3)과 같이 RR에서의 하지의 각운동량 X, Y, Z 성분은 각각 -0.43 ± 0.04 s⁻¹, -0.35 ± 0.07 s⁻¹, 0.40 ± 0.02 s⁻¹로 나타났고, 전신의 각운동량 X, Y, Z 성분은 각각 -1.12 ± 0.06 s⁻¹, 0.49 ± 0.15 s⁻¹, 0.80 ± 0.05 s⁻¹로 나타났다. S3의 경우 하지의 각운동량의 Z 성분은 0.44 s⁻¹로 가장 크고, 전신의 각운동량의 Y 성분은 0.66 s⁻¹로 가장 컸다. 그리고 선수들의 RR에서의 무릎 관절각은 109 ± 17 deg로 나타났고, RG에서의 신체 중심의 구심 속도는 1.48 ± 0.27 m/s로 나타났다. S3의 경우 무릎 관절각은 118 deg로 비교적 크게 나타났고, 구심 속도는 1.96 m/s로 가장 컸다.

Table 2. Descriptive statistics about kinematic variables at release and during the aerial phase

	COG position of body (m)						COG vel of body (m/s)			Angle (deg)	Cumulative time (s)			
	Y			Z			Y	Z	R		PH	RR	RG	SP + AP
	RL	PH	RG	RL	PH	RG				RL				
S1	-0.67	0.08	0.69	0.43	1.22	0.66	1.74	3.94	4.31	66	0.43	0.55	0.77	1.98
S2	-0.62	0.05	0.69	0.47	1.22	0.61	1.63	3.84	4.17	67	0.41	0.49	0.76	1.97
S3	-0.68	0.00	0.61	0.48	1.39	0.62	1.55	4.22	4.50	70	0.44	0.60	0.84	2.02
S4	-0.64	0.11	0.77	0.46	1.28	0.66	1.70	4.01	4.36	67	0.44	0.52	0.79	1.98
S5	-0.62	0.02	0.65	0.56	1.32	0.63	1.64	3.86	4.20	67	0.39	0.53	0.77	2.03
M	-0.65	0.05	0.68	0.48	1.29	0.64	1.65	3.97	4.31	67	0.42	0.54	0.79	2.00
SD	0.02	0.04	0.05	0.04	0.06	0.02	0.07	0.14	0.12	1	0.02	0.04	0.03	0.02

Vel = velocity

Table 3. Angular momenta, knee angle at ready to re-grasp and radial velocity of body at re-grasp

	AM of lower extremities (s ⁻¹)				AM of body (s ⁻¹)				Knee angle (deg)	RV of body (m/s)
	X	Y	Z	R	X	Y	Z	R		
					RR					RG
S1	-0.40	-0.30	0.39	0.63	-1.11	0.53	0.81	1.47	95	1.46
S2	-0.41	-0.41	0.38	0.69	-1.11	0.53	0.81	1.47	98	1.19
S3	-0.49	-0.34	0.44	0.75	-1.11	0.66	0.77	1.50	118	1.96
S4	-0.47	-0.44	0.38	0.75	-1.24	0.20	0.89	1.54	139	1.27
S5	-0.41	-0.23	0.39	0.61	-1.06	0.54	0.73	1.40	96	1.49
M	-0.43	-0.35	0.40	0.69	-1.12	0.49	0.80	1.48	109	1.48
SD	0.04	0.07	0.02	0.06	0.06	0.15	0.05	0.05	17	0.27

AM = angular momentum, RV =radial velocity

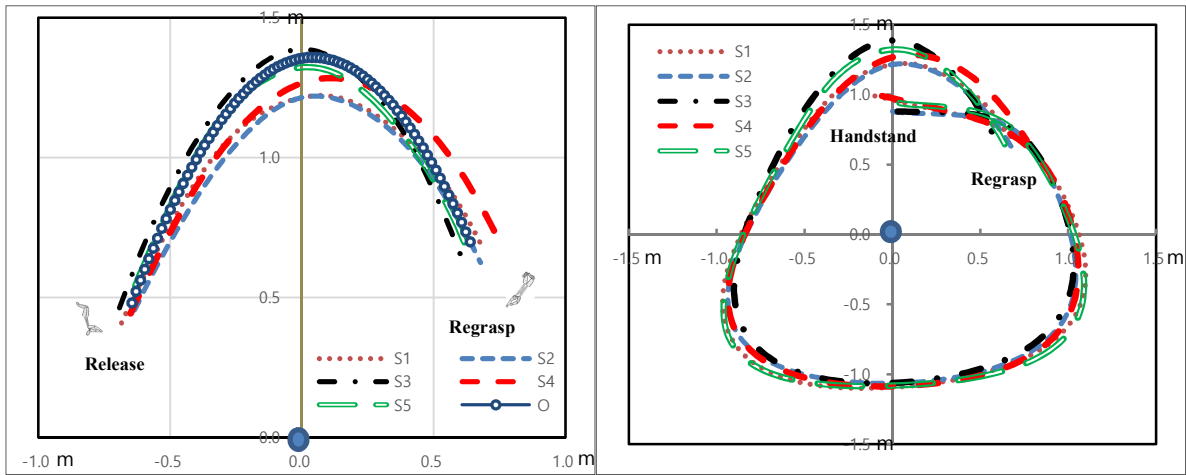


Figure 4. Body COG path during aerial phase (L) and during whole phase (R)

4. 체공 구간에서의 신체 중심 궤적 최적화

체공 구간에서의 신체 중심 궤적과 전체 구간에서의 신체 중심 궤적은 (Figure 4)와 같이 나타났다.

(Figure 4)의 왼쪽은 체공 구간이고, 오른쪽은 전체 구간이다. 왼쪽 그림을 보면 선수들마다 투사 위치는 조금 다르고, 투사 속도가 달라서 신체 중심의 체공 궤적은 서로 상이하였으며, 되잡기 위치에 영향을 미친 것을 알 수 있었다. 구심 속도가 1.4 m/s 이상인 앙상블 (ensemble) 자료인 최적화 궤적(o)을 이상적인 궤적이라고 볼 때, 여기에 가장 근접한 선수는 S3인 것으로 나타났고, 오른쪽 그림에서 S3은 흔들기에서 안쪽 궤도를 돌아 바를 어깨로 버틴 후 큰 수직 속도로 투사되어 높은 정점에 도달하고, 그 후에 바에 약간 근접하는 되잡기 패턴을 보였다.

DISCUSSION

본 연구의 대상자인 S1, S2, S3는 국가대표 선수이고, S4와 S5는 실업

팀 대표 선수들이다. 선수들이 Kolman 기술의 되잡기를 성공하였고, 이후 후속 연결기를 수행하였으므로 흔들기 동작과 공중 동작은 최적 수행에 가까웠다고 볼 수 있다. 특히 기능적 구간에서의 어깨 관절을 굽히고 엉덩 관절을 젖히며, 다시 어깨 관절을 펴고 엉덩 관절을 굽히는 타이밍은 서로 일치한 것으로 분석되었다(Hiley, Zuevsky & Yeadon, 2013).

흔들기 동작에서 엉덩 관절과 어깨 관절의 움직임이 전신의 각운동량에 큰 영향을 미치므로(Hiley et al., 2007) 선행 연구와의 비교를 위해 HE 순간과 RL 순간 간의 엉덩 관절각과 어깨 관절각의 변화량을 보면 각각 78 deg, 78 deg로 산출되었는데, 이는 Song & Park (2011)의 100 deg, 100 deg과 Back 등 (2009)의 99 deg, 64 deg와 큰 차이를 보였다. 또 Irwin 등 (2017)의 Kovacs에서의 101 deg, 84 deg와 차이를 보여, 국내 우수선수들은 기능적 구간이 끝나는 바가 원 위치하는 순간(OP)에서 엉덩 관절의 굽히기와 어깨 관절의 펴기를 작게 하여 바에 대한 전신의 관성모멘트를 증가시켜서 투사 준비를 한 것으로 보인다. 이로 인해 OP에서의 전신의 전방 회전(somersault) 각운동량의 손실(2.9 s⁻¹)이 초래되었으나, 선수들은 이 자세에서 투사 순간의 신체

중심의 위치를 조절한 것으로 판단되며, 선수들이 흔히 말하는 어깨 버티기 자세를 잘 설명해준다. 그리고 OP의 각운동량에서 S3가 다른 선수들보다 크게 나타났고(3.1 s^{-1}), 국내 선수들의 LP에서의 Y축 위치 -0.11 m 가 Shen & Tsai (2005)의 -0.17 m 보다 작으므로 흔들기에서의 상승 동작은 선행 연구보다 빠르게 진행되었음을 알 수 있다. 흔들기 구간의 누적 시간 1.21 s 는 Song & Park (2011)의 1.22 s , Back 등 (2009)의 1.17 s 와 큰 차이가 없었고, S3의 누적 시간 1.18 s 는 다른 선수들에 비해 0.04 s 작았으나, 기능적 구간에서의 시간 0.38 s 는 다른 선수들에 비해 0.02 s 큰 것으로 분석되었다.

투사 순간의 신체 중심의 위치 Y, Z 성분 -0.65 m , 0.48 m 은 Back 등 (2009)의 -0.67 m , 0.46 m 와 비슷했고, Park (2007)의 -0.99 m , 0.42 m 와는 차이를 보였다. 국내 선수들의 이 위치는 (Figure 3)에서와 같이 비슷하게 나타났고, S5만 수직 위치가 조금 높았다(0.56 m). 이러한 신체 중심의 위치가 되잡기 위치에 영향을 미치지 못하지만, 투사 순간의 신체 중심 Z축 위치가 되잡기 순간의 Y, Z축 위치 간에는 낮은 부적 상관($r = -.42, -.43$)을 보이므로 후속 연결기를 위해서라도 투사 순간의 신체 중심 Z축 위치를 조절할 필요가 있어 보인다. 또 최대 정점 높이 1.29 m 는 앞선 연구결과와 1.37 m , 1.34 m 그리고 Cuk (1995)의 1.38 m 보다 낮은 것으로 나타났는데, Song & Park (2011)은 이 높이가 1.5 m 이상되어야 Kolman 기술을 성공할 수 있다고 밝혀 선행 연구의 결과와 차이를 보였다. 본 연구의 신체 중심의 투사 속도 Y, Z 성분 1.65 m/s , 3.97 m/s 는 Song & Park (2011)의 1.9 m/s , 4.1 m/s , Back 등 (2009)의 1.77 m/s , 4.37 m/s 그리고 Cuk (1995)의 1.94 m/s , 4.17 m/s 보다 작았고, Park (2007)의 1.84 m/s , 3.93 m/s 의 수평 속도에서는 차이를 보였다. 본 연구의 국내 선수들의 투사각은 67 deg 로 Song & Park (2011)의 65 deg , Park (2007)의 65 deg 그리고 Cuk (1995)의 65 deg 보다 약간 컸고, Back 등 (2009)의 68 deg 와 비슷했다. 본 연구의 체공 시간 0.79 s 는 국내 선행 연구들의 평균 0.82 s 보다 작았지만, 양손 되잡기 순간으로 재계산하면 차이가 없는 것으로 분석되었으며, Cuk (1995)의 1.0 s 보다 크게 작았다.

(Table 3)과 같이 되잡기를 준비할 때 하지와 전신의 X축 각운동량은 시계 방향으로 같고, Z 축은 반 시계 방향으로 같았으나, Y축에서는 하지가 시계 방향(-0.35 s^{-1})이고, 전신은 반 시계 방향(0.49 s^{-1})으로 되잡기를 준비하는 것으로 나타났다. 이러한 하지의 시계 방향의 회전(tilt)은 후속 연결기를 위한 안정적인 자세를 확보하기 위한 자연스러운 동작이다. 이 순간에 선수들은 평균 109 deg 정도의 무릎 굽힘 각을 유지하면서 하지의 Y 축에서의 시계 방향의 회전 동작을 만들고 있다. 특히 S3와 S4는 무릎 관절의 굽힘 각을 적당히 크게 하면서(118 deg , 139 deg) 되잡기를 준비하고 있어 이 선수들은 되잡기 준비를 좀 빠르게 한다는 것을 알 수 있다. 결국 되잡기 준비 순간에 꼬여진 하체를 Y축과 Z축에서 얼마나 비틀 것인가가 중요한데, 이러한 움직임은 바와 손 간의 거리와 후속 연결기 자세에 영향을 미치게 된다. S3는 되잡기 준비 순간에 다른 선수들에 비해 전신의 Y축 회전(tilt)이 크고(0.66 s^{-1}), 하지의 Z축 회전(twist)이 큰(0.44 s^{-1}) 패턴을 보였다.

비교할 수 있는 선행 연구가 없지만 (Figure 4)에서 나타난 선수들의 신체 중심의 이동 궤적을 생각해 볼 때, 국내 선수들은 투사 순간에 신체 중심의 수평 위치에는 변동성이 없으나($s = .02$), 신체 중심의 수평 속도와 수직 속도가 달라서 다양한 이동 궤적을 만들어 되잡기 위치에는 변동성이 있었다($s = .05$). 그렇지만 모든 선수들이 큰 문제 없

이 되잡기를 성공적으로 수행하였고 후속 연결기를 만들었으므로 본 연구의 대상자들의 Kolman 기술력은 좋았다고 판단한다.

본 연구의 결과를 토대로 모든 선수들이 개선해야 할 주요 요소를 살펴보면, S1의 경우 기능적 구간인 LP에서의 수평 위치를 줄여야 하며, 투사 순간의 신체 중심의 수직 속도를 증가시켜 최적점의 위치를 높여야 한다. 또 S2의 경우 OP에서 어깨 관절각을 약간 증가시킬 필요가 있고, 몸을 투사시킨 후 바에 대한 구심 속도를 크게 할 수 있는 신체 중심의 이동 궤적을 만들어야 한다. S3의 경우 흔들기 구간에서의 동작이 좋아 큰 투사 속도(4.5 m/s)를 만들었는데, 투사 순간의 수평 속도를 약간 증가시킨다면 되잡기 수평 위치가 바에서 멀어져 후속 연기가 안정적으로 이루어질 수 있다고 판단한다. S4의 경우 OP에서 어깨 관절각이 작았지만(128 deg), 투사 수평 속도가 비교적 커서(1.70 m/s) 되잡기 순간의 수평 위치가 바에서부터 멀어져 구심 속도가 작아진(1.27 m/s) 단점이 파악되었다. S5의 경우 기능적 구간에서의 궤적과 흔들기 시간이 긴(1.26 s) 상태에서 몸이 던져져 투사 속도가 작았고(4.20 m/s), OP에서의 전신의 각운동량(2.9 s^{-1})과 되잡기 순간의 전신의 각운동량(1.4 s^{-1})이 가장 작았다.

CONCLUSION

본 연구는 대표 선수를 포함한 국내 우수선수 5명의 Kolman 기술의 구간별 시간, 흔들기 구간에서의 엉덩 관절각과 어깨 관절각, 전신의 위치와 각운동량, 체공 구간에서의 신체 중심의 위치와 관계 및 투사 속도, 되잡기 순간에서의 하지 및 전신의 각운동량, 무릎 관절각과 구심 속도, 그리고 체공 구간에서의 최적화된 신체 중심의 이동 궤적을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 국내 우수선수들은 어깨 관절과 엉덩 관절의 움직임의 타이밍과 신체 중심의 위치, 그리고 전신의 각운동량을 적절하게 조절하면서 흔들기를 수행하고, 기능적 구간을 빨리 준비하는 패턴을 보였다.

둘째, 투사 순간에 선수들은 신체 중심의 Y, Z 위치(-0.65 m , 0.48 m)와 속도(1.65 m/s , 3.97 m/s) 그리고 투사각(67 deg)을 만들어 공중에서 정점의 높이(1.29 m)를 얻었고, 충분한 체공 시간(0.79 s)을 확보하였다.

셋째, 국내 우수선수들은 되잡기를 준비할 때 하지와 전신의 각운동량 X 축은 시계 방향으로 같고, Z 축은 반 시계 방향으로 같았으나, Y축에서는 하지가 시계 방향(-0.35 s^{-1})이고, 전신은 반 시계 방향(0.49 s^{-1})이었다. 이 순간에 선수들은 평균 109 deg 정도의 무릎 굽힘 각을 유지하였다.

넷째, 국내 우수선수들은 투사 순간에 신체 중심의 위치에는 변동성이 없었으나, 신체 중심의 수평 속도와 수직 속도가 달라서 다양한 이동 궤적을 만들어 되잡는 위치에는 변동성이 있었다

REFERENCES

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, 1-18. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Aramatzis, A. & Brüggemann, G. P. (1999). Mechanical energetic pro-

- cesses 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.
- Back, J. H., Park, J. C. & Yoon, C. S. (2009). A study about the training program for the Kolman technique on the horizontal bars. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 19(1), 37-47.
- Cuk, I. (1995). Kolman and Pegan saltos on the high bar. In T. Bauer (Ed.), *Proceedings of the 13 International Symposium on Biomechanics in Sports*, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Canada. 119-122.
- F. I. G. (2017). *Code of points for men's artistic gymnastics competitions at world championship, Olympic games, regional and international competitions events with international participants*. International Gymnastics Federation Men's Technical Committee.
- Hiley, M. J. & Yeadon, M. R. (2016). What governs successful performance of a complex body movement: The Kovacs release-re-grasp on horizontal bar? *Journal of Biomechanics*, 49, 3971-3976.
- Hiley, M. J., Yeadon, M. R. & Buxton, E. (2007). Consistency of performance of the Tkatchev release and re-grasp on high bar. *Journal of Applied Biomechanics*, 9, 66-83.
- Hiley, M. J., Zuevsky, V. V. & Yeadon, M. R. (2013). Is skilled technique characterized by high or low variability? – An analysis of high bar giant circles. *Human Movement Science*, 31, 171-180.
- Irwin, G. & Kerwin, D. G. (2005). Biomechanical similarities of progressions for the long swing on high bar. *Sports Biomechanics*, 4(2), 164-178.
- Irwin, G., Exell, T. A., Manning, M. L. & Kerwin, D. G. (2017). Functional phases and angular momentum characteristics of Tkatchev and Kovacs. *Journal of Sports Sciences*, 35(6), 610-616.
- Lim, K. C. (2020). The evaluation of the swing and aerial motion of Kovacs on horizontal bar. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 34(4), 1-7.
- Park, J. H. (2007). Kinematical analysis for assessment of completion extent in Kolman movement of horizontal bar. *Journal of Coaching Development*, 9(3), 267-276.
- Shen, M. C. & Tsai, C. L. (2005). Kinematical analysis of Kolman acrobatics in the high bar exercise. In *Proceedings of the 20th Congress of International Society of Biomechanics*, July 31 - August 5, Cleveland, Ohio.
- Song, J. H. & Park, J. C. (2011). Analysis of kinematic factors of the improvement of performance ability of Kolman technique in the horizontal bars. *Korean Journal of Sport Science*, 22(2), 1902-1909.
- Visol (2005). *Kwon3d motion analysis package version 3.1 User's reference manual*. Seoul, Visol.
- Yeadon, M. R. & Hiley, M. J. (2000). The mechanics of the backward giant circle on high bar. *Human Movement Science*, 19(2), 153-173.
- Youtube (2016). Epke Zonderland wins artistic men's horizontal bar gold - London 2012 Olympics. Available online. <https://youtu.be/SEsU9FWV-Co>