



Original Article

Effects of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction on Lower Limb Joint Angle and Shock Absorption Pattern of Adult Males during Single-Leg Drop Landing

Chan-ki Kim^{2,5}, Eun-bi Park^{2,5}, Hyung-woo Lee^{2,5} and Kyoung-kyu Jeon^{1,2,3,4,5*}

¹Division of Sport Science, Incheon National University

²Department of Human Movement Science, Incheon National University

³Sport Science Institute, Incheon National University

⁴Health Promotion Center, Incheon National University

⁵Functional Rehabilitation Biomechanics Laboratory, Incheon National University

Article Info

Received 2024. 02. 26.

Revised 2024. 06. 03.

Accepted 2024. 06. 19.

Correspondence*

Kyoungkyu Jeon
jeonkay@inu.ac.kr

Key Words

Anterior cruciate ligament,
ACL reconstruction, Knee injury,
Drop landing, kinetics

PURPOSE This study analyzed the difference in lower extremity joint angle and shock absorption patterns at the point of maximum ground reaction force during single-leg drop landing with or without anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR). **METHODS** Forty adult males were recruited for this study, with 19 in the ACLR group (age: 20.52±1.43years, height: 179.26±5.18cm, weight: 74.91±6.29kg) and 21 in the control group (age: 21.42±1.61years, height: 174.97±6.83cm, weight: 69.27±7.56kg). Participants performed single-leg landings on a 30cm tall box. An independent sample t-test was used to analyze the difference in kinetics variables at the point of maximum ground reaction force upon landing, with significance set at $p=0.05$. **RESULTS** The lower limb joint angle showed significant differences in hip flexion, hip abduction, knee flexion, and knee valgus ($p<0.05$) between groups. There was no significant difference between the groups of the results of kinetics variables during single-leg landing (maximum ground reaction force, lower extremity stiffness, and shock absorption time). **CONCLUSIONS** The ACLR group showed a clear difference in kinematics compared to the control group, but no significant difference in kinetic results was found. The two groups compensated for the same impact with different movements, though movements in the ACLR group may increase the risk of ACL re-injury. Those with ACLR should strive to reduce the risk of re-injury by training to use correct movements.

서론

전방십자인대(anterior cruciate ligament, ACL)는 대퇴골에 대한 경골의 전방 이동을 방지하여 회전 움직임에 대한 안정성을 제공하는 인대이다(Lin et al., 2018). ACL 손상 및 재손상에 대한 비접촉 기전의 비율은 70-80%에 해당하며(Markström et al., 2020), 미국

에서는 매년 약 200,000건 이상의 부상이 발생된다고 보고되고 있다(Arundale et al., 2022). ACL의 부상 기전 중 하나인 비접촉 손상 기전에 대한 대부분의 부상 패턴은 방향 전환과 착지 전의 급격한 감속으로 인해 일어난다고 보고되고 있다(Boden et al., 2009; Della Villa et al., 2020). 장기적인 중재에도 불구하고 ACL의 파열 등과 같은 심각한 손상은 운동 범위 제한, 대퇴사두근 근력 손상, 관절염 등 다양한 형태로 무릎관절의 기능 저하를 나타낼 수 있다(Boden & Sheehan, 2022; Kaplan & Witvrouw, 2019; Nawasreh et al., 2017).

전방십자인대 재건술(ACL Reconstruction, ACLR)은 무릎관절

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 안정성 확보 및 이차적인 손상 예방 그리고 손상 이전의 활동 수준으로 돌아갈 수 있도록 하기 위해 시행된다(Tapasvi & Shekhar, 2021). 일반적인 ACLR 후 재활은 재건술 이후에도 이식 실패 비율은 약 3-25%로 보고되고 있다(Wiggins et al., 2016). 수술로 인해 반대측 무릎관절에 부하 증가 및 과사용 등의 위험 요인과 스포츠 복귀에 따른 잔여 손상, 보상적 패턴 등으로 인한 다인성 손상이 나타날 수 있기 때문에(Paterno et al., 2014), 재활 프로토콜은 수술 후 예후를 고려하여 점진적으로 이루어진다(Cavanaugh & Powers, 2017). 재손상에 따른 ACL 부상의 위험성은 최초 손상보다 더 크게 나타나며(Paterno et al., 2010), 1차 ACLR에 비해 재수술 후 무릎관절 기능의 저하와 함께 방사선학적으로 높은 골관절염(osteoarthritis) 발생률이 증가되어 나타난다(Grassi et al., 2016). 또한, 1차 ACLR 이후 5년 이내 약 12% 이상의 재손상이 나타난다고 보고되고 있으며(Buckthorpe, 2019; Salmon et al., 2005), 손상 관련 위험 요소의 확인은 2차 손상 및 후유증의 위험을 효과적으로 줄이는데 필수적으로 이루어져야 한다(Buckthorpe, 2019, 2021; Paterno et al., 2010).

손상 이후, 일상생활 또는 스포츠로 복귀하려는 ACLR 환자의 착지 능력을 검사는 무릎관절의 기능과 ACL 재손상을 예측할 수 있기 때문에 손상된 관절에 대한 생체역학적 평가와 이해가 중요하다(Johnston et al., 2018). 한 발 점프 착지는 일상생활과 스포츠 등에서 흔히 나타나는 패턴으로, 하지의 생체역학을 평가하기 위해 주로 활용되고 있으며(Wilczyński et al., 2020), 착지 시 나타나는 큰 충격과 급격한 감속 및 이동 방향 변경으로 인해 ACL 부상과 높은 연관성을 가지고 있다(Weitz et al., 2020; Yeow et al., 2010). 선행연구에 따르면, 한 발 착지 방법은 전두면 조사각도(frontal plane projection angle, FPPA)에서 무릎 외반을 더 잘 식별할 수 있음을 보고하였으며, 이는 스포츠의 부상 메커니즘을 양측 Drop-jump 보다 구체적으로 식별할 수 있는 좋은 측정 방법이라고 제안하였다(Munro et al., 2017). 또한, 점프보다 착지 동작에서 최대 근위 경골 전방 전단력이 증가하여 ACL에 더 많은 부담을 주며(Chappell et al., 2002), 착지 시 무릎관절이 신전 상태가 될 때 강한 외반력으로 인해 큰 부상 기전이 발생된다(Boden & Sheehan, 2022; Diermeier et al., 2021; Olsen et al., 2004).

ACL의 손상 기전 중 하나인 동적 무릎 외반(dynamic knee valgus)은 대퇴골의 내전 및 내회전, 무릎의 외전, 경골의 전방 병진 운동 및 외회전, 발목 외반 등을 잠재적으로 포함하여 구성된 하지의 움직임으로 정의된다(Wilczyński et al., 2020). 이러한 손상 위험에도 불구하고, 한 발 착지 동작을 통해 ACLR 유무에 따른 움직임 패턴에 대한 차이를 비교하는 연구와 단일 다리 동작에서 일어나는 역학적 연구는 부족한 실정이다.

본 연구의 가설은 한 발 착지 시 ACLR 집단이 건강한 대조 집단에 비해 동적 무릎 외반과 관련된 하지의 움직임이 나타날 것이고, ACLR 집단이 대조 집단에 비해 충격 흡수 패턴이 좋지 않을 것이라고 예상하였다. 따라서, 본 연구는 목적은 ACLR 유무에 따라 한 발 착지 시 최대지면반력 시점에서의 하지 관절 각도와 착지 시 충격 흡수 패턴의 차이를 비교 분석하여, ACL 재손상 위험 요인에 대처할 수 있는 기초 자료를 제공하는 목적이 있다.

연구 방법

연구 대상

본 연구의 대상자는 총 40명으로 전방십자인대 재건술을 받은 성인 남성 19명(나이: 20.52 ± 1.43 years, 신장: 179.26 ± 5.18 cm, 체중: 74.91 ± 6.29 kg)과 건강한 남성 21명(나이: 21.42 ± 1.61 years, 신장: 174.97 ± 6.83 cm, 체중: 69.27 ± 7.56 kg)으로 집단을 구분하였다. 최근 6개월 이내에 무릎 및 발목관절 그리고 허리 등 근골격계에 이상이 없는 대상으로 하였다. 본 연구는 인천대학교 기관생명윤리위원회에 승인을 받은 후 진행되었으며(INU-IRB.7007971-202006-006A), 실험 참여 전 모든 대상자에게 연구 목적, 위험성, 절차 등에 대해 충분히 설명한 후 자발적으로 참가 동의서에 서명하였다. 본 연구 대상자들의 신체적 특징은 <Table 1>과 같다.

실험 절차

한 발 착지는 Orishimo et al.(2014)의 연구를 토대로, 가슴에 양 팔을 교차한 채로 높이 30cm의 박스 위에서 서서히 무게중심을 전방으로 이동하여 자유 낙하할 수 있도록 하였다. 착지 후 양 팔을 가슴 위로 올린 채로 약 5초간 균형을 유지하도록 하였으며, 착지 시 지면반력기 밖으로 착지하거나 착지 후 중심을 잡지 못해 흔들리는 경우 등은 모두 실패로 간주하고 재측정을 실시하였다. 부상 방지를 위해 측정 전 준비 운동 실험 동작인 한 발 착지에 대한 연습을 실시한 후 본 실험을 진행하였다. 모든 대상자는 정확한 동작의 특성을 측정하기 위해 맨발로 실시하였으며, 착지 후 5초 이상 균형을 유지할 수 있도록 하였다. 모든 대상자들의 ACLR이 오른쪽 다리이기 때문에 왼쪽 다리부터 오른쪽 다리 순서로 실시하였다. 또한, 분석의 정확성을 위해 성공적인 동작 3회를 선별하여 평균값을 산출하였고, ACLR 집단의 환측 다리와 대조 집단의 우측 다리를 최종 분석 자료로 활용하였다.

동작 분석 및 지면반력 분석

한 발 착지 시 하지 주요 관절의 역학적 자료 수집을 위해 8대의 영상분석 카메라(6 Eagle Camera & 2 Raptor System, Motion Analysis Corp., USA)와 1대의 지면반력기(QR6-5-2000, AMTI Inc., USA)를 활용하였다. 영상분석 카메라의 촬영 속도 샘플링 비율은 120 frames/sec으로 설정하였고, 대상자를 중심으로 전후방 및 좌우측 방향에 총 8대의 카메라를 좌표 기준점으로부터 동작의 범위를 완전히 포함할 수 있도록 설정하였으며, 대상자가 착

Table 1. Characteristic subjects (Mean \pm SD)

Group	ACLR (n=19)	Control (n=21)	<i>p</i>
Age (years)	20.52 \pm 1.43	21.42 \pm 1.61	.105
Height (cm)	179.26 \pm 5.18	174.97 \pm 6.83	.025
Weight (kg)	75.20 \pm 6.13	69.27 \pm 7.56	.007
ACLR leg	R	N	

Abbreviations. ACLR: anterior cruciate ligament reconstruction; R: Right leg; N: None

지하는 전후 방향을 Y축, 좌우 방향을 X축, 지면으로부터 수직 방향을 Z축으로 설정하여 분석하였다. 또한, Helen Hayes Markers Set(Kadaba et al., 1989)에 의거하여 영상분석 시스템에서 신체 분절을 형성하기 위해 신체 대상자 하지를 중심으로 총 19개의 반사 마커를 부착하여 정적 자세를 촬영하고, 실험 동작에 영향이 없도록 무릎 및 발목관절의 내측에 부착된 4개의 마커를 제거한 후, 총 15 개의 마커를 사용하여 동작을 측정하였다(Figure 1).

지면반력 변인은 각 대상자의 체중으로 나누어 표준화하였고(% BW), 그중 최대 수직 지면반력(maximum ground reaction force, mGRF) 값을 분석하였다. 최대 수직 지면반력 시점에서 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절의 각도와 최대 수직 지면반력과 부하율(Loading rate), 하지 강성(Leg stiffness) 데이터 분석을 동작 분석 소프트웨어 (Cortex 5.0, Motion Analysis Corp, USA)를 활용하였다.

자료 처리

자료 처리를 위해 신체는 분절로 연결된 강체 시스템으로 인체 관절 중심점을 좌표화하여 분석하였다(Plagenhoef et al., 1983) (Figure 2). 데이터 처리 시 노이즈에 대한 오차 제거를 위해 차단 주파수(cut-off frequency) 10Hz로 설정하여 저역통과 디지털 필터링(Butterworth Low-Pass Digital Filtering)방법을 활용하여 스무딩(smoothing)을 실시하였고 이때, 오차 범위는 0.3mm 이내로 설정하였다. 지면반력 데이터는 초당 1,200Hz로 샘플링하여 분석하였고, 모든 데이터 시점을 일치시키기 위해 아날로그-컨버터(NI-USB 6218, National Instruments, Hungary)에 의해 동기화 하였다.

하지 강성은 다음과 같은 공식으로 산출되었다. mGRF는 최대 수직 지면반력을 각 대상자의 체중으로 나누어 표준화 한 값이며, ΔL은 지면 초기 접촉 시점부터 최대 수직 지면반력 시점까지 골반 질량 중심의 수직 변화 비율이다. 이는 하지 강성의 값이 클수록 최대 수직 지면반력 시점에 골반 질량 중심의 수직 변화율이 낮은 것을 말하며, 하지 관절이 더 경직된 착지를 수행하는 것을 의미한다.

$$Leg\ stiffness = \frac{mGRF}{\Delta L}$$

부하율(Loading rate)은 다음과 같은 공식으로 산출되었다. 최대 수직 지면반력에 도달하는 시간(time to mGRF)은 초기 접촉 시점부터 수직 지면 반력 시점까지의 시간이다.

$$Loading\ rate = mGRF / Time\ to\ mGRF$$

통계 처리

본 연구에서 산출된 모든 결과 변인은 Windows용 통계 프로그램인 SPSS 26.0(IBM, USA)을 사용하였으며, 대상자로부터 수집된 모든 변인은 평균 및 표준편차(Mean±SD)로 산출하였다. 모든 데이터에 대한 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk test를 실시하였다. ACLR 집단의 부상 하지인 우측 다리와 대조 집단의 우측 다리의 한 발 착지 시 최대지면반력 시점의 하지 관절 각도와 최대지면반력(Maximum Ground Reaction Force, mGRF), 하지강성(Leg Stiffness), 부하율(Loading Rate) 차이를 분석하기 위해 독립 표본

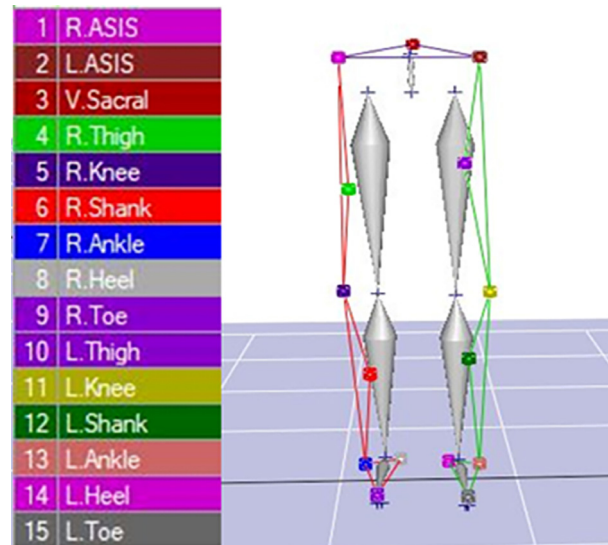


Fig. 1. Helen Hayes Markers Set (Dynamic marker set)

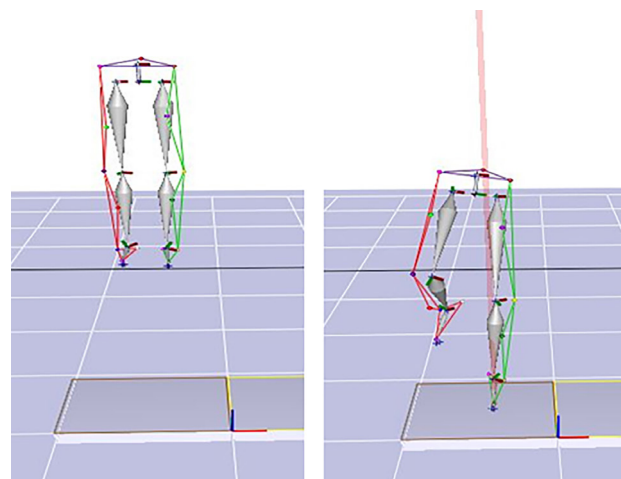


Fig. 2. Point of maximum ground reaction force

t-검정(Independent t-test)을 사용하였다. 모든 통계 결과에 대한 유의 수준은 p=0.05로 설정하였다.

연구 결과

단일 다리 착지 시 운동학적 변인 결과

ACLR 집단과 대조 집단 간 한 발 착지 시 최대지면반력시점의 하지 관절 각도의 차이는 <Table 2>와 같다. Hip Flexion(t₃₈=2.934, p=.006), Hip Abduction(t₃₈=-4.517, p≤.0001), Knee Flexion(t₃₈=2.585, p=.014), Knee valgus(t₃₈=2.272, p=.029)에서 유의한 차이가 나타났다. ACLR 집단은 대조 집단에 비하여 엉덩관절의 굴곡 및 내전과 무릎관절의 굴곡 및 외반 각도가 크게 나타났다(p<.05).

Table 2. Result of difference in angle of lower extremity joint at the time of maximum ground reaction force

Kinematics Variables		ACLR group	Control Group	<i>t</i>	<i>p</i>
Hip	Flexion	11.68 ±4.74	7.79 ±3.62	2.934	0.006
	Abduction	-11.14 ±6.40	-0.99 ±7.67	-4.517	≤0.0001
	Internal Rotation	31.94 ±6.28	34.02 ±5.71	-1.099	0.279
Knee	Flexion	-2.26 ±3.73	-5.36 ±3.89	2.585	0.014
	Valgus	-5.36 ±9.41	-11.98 ±9.03	2.272	0.029
	Internal Rotation	9.07 ±6.26	7.83 ±4.57	0.721	0.475
Ankle	Plantar flexion	-4.53 ±8.61	-6.76 ±8.31	0.832	0.410
	External Rotation	-20.89 ±9.50	-21.52 ±6.55	0.246	0.807
	Eversion	31.94 ±11.57	32.92 ±6.92	-0.320	0.751

p*<.05, *p*<.01; ****p*≤0.0001

Note: Data are mean ± standard deviation, + is the movement on the table, and - is the opposite movement. (+: Flexion, Abduction, Valgus, Internal Rotation and Eversion, Abbreviation. ACLR: Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Table 3. Results of mGRF and shock absorption pattern

Kinetics Variables	ACLR Group	Control group	<i>t</i>	<i>p</i>
mGRF (%BW)	3.19 ± 0.35	3.16 ± 0.40	0.264	0.793
Leg stiffness (N/ms)	35.31 ± 6.74	38.19 ± 11.07	-0.983	0.332
Loading Rate (N/cm)	62.99 ± 11.65	68.36 ± 25.12	-0.390	0.701

Note: Data are mean ± standard deviation, Abbreviation. ACLR: Anterior Cruciate Ligament Reconstruction, mGRF: Maximum Ground Reaction Force

단일 다리 착지 시 역학적 변인 결과

ACLR 집단과 대조 집단 간 한 발 착지 시 하지 강성, 최대지면반력, 부하율의 차이는 <Table 3>과 같다. Leg stiffness, mGRF, Loading Rate에서 각 집단 간의 유의한 차이가 나타나지 않았다.

논의

본 연구는 전방십자인대 재건술 집단과 건강한 대조 집단을 대상으로 전방십자인대 재건술이 성인 남성의 한 발 착지 시 하지 관절 각도 및 충격 흡수와 관련한 역학적 변인에 영향을 미치는지에 대하여

분석하였다.

ACLR 집단이 대조 집단에 비해 동적 무릎 외반과 관련된 하지의 움직임이 나타날 것이라 예상한 본 연구의 가설과 일치하게 한 발 착지 시 최대지면반력 시점에서 하지 관절 각도는 ACLR 집단이 대조 집단에 비하여 무릎관절의 굴곡(*p*=.014) 및 외반(*p*=.029), 그리고 엉덩관절의 굴곡(*p*=.006) 및 내전(*p*≤.0001)이 크게 나타났다. 반면에, 최대지면반력과 충격 흡수 패턴에서는 착지 시 두 집단 간의 차이가 나타나지 않았다.

본 연구의 결과에서 ACLR 집단은 대조 집단과 비교하여 착지 시 무릎관절의 굴곡(*p*=.014) 및 외반(*p*=.029)이 나타났다. 3차원적으로 움직임을 평가할 때, 내측 무릎 변위의 지표인 동적 무릎 외반은 복잡하게 신체의 다양한 관절과 모든 면에서 나타나고, 특히, 엉덩관절의 내전 및 내회전이 무릎관절의 외반과 관련된 운동학적 요인으로 포함된다(Wilczyński et al., 2020). 또한, 본 연구 결과 ACLR 집단은 대조 집단에 비해 엉덩관절의 내전이 더 크게 나타났으며, 이처럼 관상면에서 무릎관절의 외반은 엉덩관절의 운동학에까지 영향을 미칠 수 있다는 선행연구의 결과와 일치한다(Barríos & Strotman, 2014; Barríos et al., 2016).

무릎관절의 과도한 내측 변위는 기능적 결함을 나타내며 (Lorenzetti et al., 2018), 엉덩관절 내전근의 과활성, 후방 사슬 복합체 근육 조직들의 기능 장애 및 약화, 그리고 발목관절 가동 범위의 감소가 포함될 수 있다(Bell et al., 2012; Mauntel et al., 2014; Myer et al., 2014). 이는 무릎관절에서 나타나는 외반이 다양한 기능 결함을 나타내는 지표임을 근거로 무릎관절에만 초점을 맞출 것이 아니라 하지의 모든 관절과 근육을 복합적으로 고려해야 함을 나타낸다고 판단된다. 또한, 일반적으로 ACL 손상 기전은 무릎관절의 외반 증가 및 굴곡의 감소이며(Fagenbaum & Darling, 2003; Ford et al., 2005; Hewett et al., 2005; McLean et al., 2004), 이중 동적 무릎 외반은 ACL의 잠재적인 손상 위험을 예측할 수 있는 강력한 요인이다(Herrington, 2014; Hewett et al., 2005). 선행연구에서도 ACLR 집단은 착지 시 증가하는 무릎 외반 모멘트의 증가를 감소시키기 위하여 운동학적으로 보상하는 착지 패턴을 나타냈다고 보고하였다(Thurburn et al., 2015; Lewek et al., 2002). 따라서, ACL 재건술을 진행하였더라도 손상을 경험한 다리는 여전히 재손상의 위험에 노출되어 있다고 판단된다.

본 연구 결과, 착지 시 최대지면반력에서 ACLR 집단과 대조 집단 간 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 본 연구의 두 번째 가설에서 ACLR 집단이 대조 집단에 비하여 충격 흡수 패턴이 좋지 않게 나타날 것이라 가정한 두 번째 가설과 일치하지 않는다. 착지 시 충격량이 비슷하다는 것은 하지 관절에 전해지는 총 모멘트(total support moment, TSM)의 차이가 없다는 것을 의미한다(Pozzi et al., 2017). 또한, 본 연구의 ACLR 집단은 대조 집단과 비교하여 지면반력에 대한 충격 흡수 패턴>Loading Rate, Leg stiffness)에 대한 차이도 나타나지 않았다. ACLR 집단과 건강한 대조군의 한 발 착지 시 하지 신근 전체가 질량 중심을 지지하기 위한 시너지 효과를 나타내는 총 지지 모멘트(total support moment, TSM)의 크기와 분포를 살펴본 선행연구에 따르면, 집단 간 차이가 없었으나, ACLR 집단은 대조 집단에 비해 상대적으로 무릎관절 기여도가 낮았고 엉덩관절의 기여도가 높다고 보고되었다. 이는 무릎관절 모멘트 감소에 대한 일차적인 보상이 엉덩관절 모멘트 증가로 이어진다고 보고하였기 때문에(Pozzi et al., 2017), 본 연구의 운동역학적 결과와 일치한

다. 또한, 양측 착지 동작 동안 ACL 재건술을 받은 사람은 외부 무릎 굴곡 모멘트와 엉덩관절 신전 모멘트가 지속적으로 감소하는 반면에 외부 발목 족저 굴곡 모멘트는 증가하는 경향을 보였다(Paterno et al., 2010, 2011). 이러한 보상 작용은 동작을 완성하고 더 높은 수준의 일상 활동을 가능하게 하지만, 점차 대퇴사두근을 사용하지 않게 되어 정상적인 움직임 패턴과는 상당한 차이를 나타내기 때문에 ACLR 환자의 재부상 위험이 증가하게 되는 경향을 보인다(Paterno et al., 2012). 또한, 한 발 착지가 아닌 양발 착지와 같은 동작에서 ACLR 집단과 같은 충격 흡수 패턴은 부상 다리가 아닌 건강한 다리에 전이되어 동일한 패턴이 나타날 수 있다고 보고되고 있는데(Di Stasi et al., 2013, 2015; Hart et al., 2010), 이는 ACL 손상 병력이 있는 집단은 반대측 하지에서 2차 부상의 비율이 높아질 수 있음을 의미한다(Schmitt et al., 2015). 이를 바탕으로 점프 착지 동작 동안 나타나는 신경근 및 운동 제어에 대한 회복은 ACLR 후 재부상 위험을 평가하는 유용하게 사용되기도 한다(Decker et al., 2002). 즉, ACLR 집단은 대조 집단과 같은 충격을 받더라도 충격을 흡수하고 분배하는 과정에서 차이가 나타났기 때문에, 이러한 차이가 운동학적 보상으로 나타난다고 사료된다.

또한, 이러한 보상패턴은 재부상의 위험성을 증가시킬 수 있기 때문에 부상 당한 하지에 전달되는 충격 흡수를 올바른 패턴으로 분배하기 위한 하지 관절의 전체적인 협응력 향상시킬 수 있는 훈련이 필요하며, 건강한 다리의 2차 부상을 예방하기 위하여 한 다리 착지와 같은 동작뿐만 아니라 양발 착지 동작도 연습할 필요가 있다고 사료된다.

결론

ACLR 집단은 대조 집단과 비교하여 착지 시 무릎관절의 굴곡 및 외반, 그리고 엉덩관절의 굴곡 및 내전이 크게 나타났다. 운동학적으로는 분명한 차이를 보여주었으나, 하지에 전달되는 충격량과 이를 분배하는 패턴에는 차이가 나타나지 않았다. 이는 같은 충격을 받더라도 ACLR 집단은 대조 집단과 다른 움직임으로 보상했기 때문에 ACL 재부상의 위험성을 증가시킬 수 있는 움직임이다.

따라서, ACL 재건술을 한 환자는 2차 위험성에 노출되어 있는 상태이므로 ACLR 이후 적합한 재활 프로그램을 진행함과 동시에 올바른 움직임 자체에 대한 연습을 통하여 기능적 결함을 회복함으로써 재부상의 위험성을 감소시키기 위한 노력이 필요할 것이다.

CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: Kyoungkyu Jeon, Data curation: Chanki Kim, Hyungwoo Lee, Eunbi Park, Formal analysis: Chanki Kim, Hyungwoo Lee, Eunbi Park, Methodology: Kyoungkyu

Jeon, Project administration: Kyoungkyu Jeon, Visualization: Chanki Kim, Writing-original draft: Chanki Kim, Writing-review & editing: Kyoungkyu Jeon

참고문헌

- Arundale, A. J., Silvers-Graneli, H. J., & Myklebust, G. (2022). ACL injury prevention: Where have we come from and where are we going? *Journal of Orthopaedic Research*, 40(1), 43-54.
- Barrios, J. A., & Strotman, D. E. (2014). A sex comparison of ambulatory mechanics relevant to osteoarthritis in individuals with and without asymptomatic varus knee alignment. *Journal of Applied Biomechanics*, 30(5), 632-636.
- Barrios, J. A., Heitkamp, C. A., Smith, B. P., Sturgeon, M. M., Suckow, D. W., & Sutton, C. R. (2016). Three-dimensional hip and knee kinematics during walking, running, and single-limb drop landing in females with and without genu valgum. *Clinical Biomechanics*, 31, 7-11.
- Bell, D. R., Vesci, B. J., DiStefano, L. J., Guskiewicz, K. M., Hirth, C. J., & Padua, D. A. (2012). Muscle activity and flexibility in individuals with medial knee displacement during the overhead squat. *Athletic Training & Sports Health Care*, 4(3), 117-125.
- Boden, B. P., & Sheehan, F. T. (2022). Mechanism of non-contact ACL injury: OREF Clinical Research Award 2021. *Journal of Orthopaedic Research*, 40(3), 531-540.
- Boden, B. P., Torg, J. S., Knowles, S. B., & Hewett, T. E. (2009). Video analysis of Anterior Cruciate Ligament injury: Abnormalities in hip and ankle kinematics. *The American Journal of Sports Medicine*, 37(2), 252-259.
- Buckthorpe, M. (2019). Optimising the late-stage rehabilitation and return-to-sport training and testing process after ACL reconstruction. *Sports Medicine*, 49(7), 1043-1058.
- Buckthorpe, M. (2021). Recommendations for movement re-training after ACL reconstruction. *Sports Medicine*, 51(8), 1601-1618.
- Cavanaugh, J. T., & Powers, M. (2017). ACL rehabilitation progression: Where are we now? *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 10(3), 289-296.
- Chappell, J. D., Yu, B., Kirkendall, D. T., & Garrett, W. E. (2002). A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *The American Journal of Sports Medicine*, 30(2), 261-267.
- Decker, M. J., Torry, M. R., Noonan, T. J., Riviere, A., & Sterett, W. I. (2002). Landing adaptations after ACL reconstruction. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(9), 1408-1413.
- Della Villa, F., Buckthorpe, M., Grassi, A., Nabiuzzi, A., Tosarelli, F., Zaffagnini, S., & Della Villa, S. (2020). Systematic video analysis of ACL injuries in professional male football (soccer): Injury mechanisms, situational patterns and biomechanics study on 134 consecutive cases. *British Journal of Sports Medicine*, 54(23), 1423-1432.
- Di Stasi, S. L., Logerstedt, D., Gardinier, E. S., & Snyder-Mackler, L. (2013). Gait patterns differ between ACL-reconstructed athletes who pass return-to-sport criteria and those who fail. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(6), 1310-1318.
- Di Stasi, S., Hartigan, E. H., & Snyder-Mackler, L. (2015). Sex-specific gait adaptations prior to and up to 6 months after Anterior Cruciate Ligament reconstruction. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 45(3), 207-214.
- Diermeier, T. A., Rothrauff, B. B., Engebretsen, L., Lynch, A., Svantesson, E., Senorski, E. A. H., ... & Musahl, V. (2021). Treatment after ACL injury: Panther symposium ACL treatment consensus group. *British Journal of Sports Medicine*, 55(1), 14-22.
- Fagenbaum, R., & Darling, W. G. (2003). Jump landing strategies in male and female college athletes and the implications of such strategies for Anterior Cruciate Ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(2), 233-240.
- Ford, K. R., Myer, G. D., Toms, H. E., & Hewett, T. E. (2005). Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(1), 124-129.
- Grassi, A., Ardern, C. L., Muccioli, G. M. M., Neri, M. P., Marcacci, M., & Zaffagnini, S. (2016). Does revision ACL reconstruction measure up to primary surgery? A meta-analysis comparing patient-reported and clinician-reported outcomes, and radiographic results. *British Journal of Sports Medicine*, 50(12), 716-724.
- Hart, J. M., Ko, J. W. K., Konold, T., & Pietrosimone, B. (2010). Sagittal plane knee joint moments following Anterior Cruciate Ligament injury and reconstruction: A systematic review. *Clinical Biomechanics*, 25(4), 277-283.
- Herrington, L. (2014). Knee valgus angle during single leg squat and landing in patellofemoral pain patients and controls. *The Knee*, 21(2), 514-517.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., Jr., Colosimo, A. J., McLean, S. G., ... & Succop, P. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict Anterior Cruciate Ligament injury risk in female athletes: A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(4), 492-501.
- Ithurburn, M. P., Paterno, M. V., Ford, K. R., Hewett, T. E., & Schmitt, L. C. (2015). Young athletes with quadriceps femoris strength asymmetry at return to sport after Anterior Cruciate Ligament reconstruction demonstrate asymmetric single-leg drop-landing mechanics. *The American Journal of Sports Medicine*, 43(11), 2727-2737.
- Johnston, P. T., McClelland, J. A., & Webster, K. E. (2018). Lower limb biomechanics during single-leg landings following Anterior Cruciate Ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(9), 2103-2126.
- Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., Gainey, J., Gorton, G., & Cochran, G. V. B. (1989). Repeatability of kinematic, kinetic, and electromyographic data in normal adult gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 7(6), 849-860.
- Kaplan, Y., & Witvrouw, E. (2019). When is it safe to return to sport after ACL reconstruction? Reviewing the criteria. *Sports Health*, 11(4), 301-305.
- Lewek, M., Rudolph, K., Axe, M., & Snyder-Mackler, L. (2002). The effect of insufficient quadriceps strength on gait

- after Anterior Cruciate Ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics*, 17(1), 56-63.
- Lin, C. Y., Casey, E., Herman, D. C., Katz, N., & Tenforde, A. S. (2018).** Sex differences in common sports injuries. *PM&R*, 10(10), 1073-1082.
- Lorenzetti, S., Ostermann, M., Zeidler, F., Zimmer, P., Jentsch, L., List, R., ... & Schellenberg, F. (2018).** How to squat? Effects of various stance widths, foot placement angles and level of experience on knee, hip and trunk motion and loading. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 10, 14.
- Markström, J. L., Grip, H., Schelin, L., & Häger, C. K. (2020).** Individuals with an Anterior Cruciate Ligament-reconstructed knee display atypical whole body movement strategies but normal knee robustness during side-hop landings: A finite helical axis analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, 48(5), 1117-1126.
- Mauntel, T. C., Frank, B. S., Begalle, R. L., Blackburn, J. T., & Padua, D. A. (2014).** Kinematic differences between those with and without medial knee displacement during a single-leg squat. *Journal of Applied Biomechanics*, 30(6), 707-712.
- McLean, S. G., Huang, X., Su, A., & van den Bogert, A. J. (2004).** Sagittal plane biomechanics cannot injure the ACL during sidestep cutting. *Clinical Biomechanics*, 19(8), 828-838.
- Munro, A., Herrington, L., & Comfort, P. (2017).** The relationship between 2-dimensional knee-valgus angles during single-leg squat, single-leg-land, and drop-jump screening tests. *Journal of Sport Rehabilitation*, 26(1), 72-77.
- Myer, G. D., Kushner, A. M., Brent, J. L., Schoenfeld, B. J., Hugentobler, J., Lloyd, R. S., ... & McGill, S. M. (2014).** The back squat: A proposed assessment of functional deficits and technical factors that limit performance. *Strength and Conditioning Journal*, 36(6), 4-27.
- Nawasreh, Z., Logerstedt, D., Cummer, K., Axe, M. J., Risberg, M. A., & Snyder-Mackler, L. (2017).** Do patients failing return-to-activity criteria at 6 months after Anterior Cruciate Ligament reconstruction continue demonstrating deficits at 2 years? *The American Journal of Sports Medicine*, 45(5), 1037-1048.
- Olsen, O. E., Myklebust, G., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004).** Injury mechanisms for Anterior Cruciate Ligament injuries in team handball: A systematic video analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(4), 1002-1012.
- Orishimo, K.F., Liederbach, M., Kremenic, I. J., Hagins, M., & Pappas, E. (2014).** Comparison of landing biomechanics between male and female dancers and athletes, part 1: Influence of sex on risk of anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 42(5), 1082-1088.
- Paterno, M. V., Rauh, M. J., Schmitt, L. C., Ford, K. R., & Hewett, T. E. (2012).** Incidence of contralateral and ipsilateral Anterior Cruciate Ligament (ACL) injury after primary ACL reconstruction and return to sport. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 22(2), 116-121.
- Paterno, M. V., Rauh, M. J., Schmitt, L. C., Ford, K. R., & Hewett, T. E. (2014).** Incidence of second ACL injuries 2 years after primary ACL reconstruction and return to sport. *The American Journal of Sports Medicine*, 42(7), 1567-1573.
- Paterno, M. V., Schmitt, L. C., Ford, K. R., Rauh, M. J., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2011).** Effects of sex on compensatory landing strategies upon return to sport after Anterior Cruciate Ligament reconstruction. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 41(8), 553-559.
- Paterno, M. V., Schmitt, L. C., Ford, K. R., Rauh, M. J., Myer, G. D., Huang, B., & Hewett, T. E. (2010).** Biomechanical measures during landing and postural stability predict second Anterior Cruciate Ligament injury after Anterior Cruciate Ligament reconstruction and return to sport. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(10), 1968-1978.
- Plagenhoef, S., Evans, F. G., & Abdelnour, T. (1983).** Anatomical data for analyzing human motion. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 54(2), 169-178.
- Pozzi, F., Di Stasi, S., Zeni, J. A., Jr., & Barrios, J. A. (2017).** Single-limb drop landing biomechanics in active individuals with and without a history of Anterior Cruciate Ligament reconstruction: A total support analysis. *Clinical Biomechanics*, 43, 28-33.
- Salmon, L., Russell, V., Musgrove, T., Pinczewski, L., & Refshauge, K. (2005).** Incidence and risk factors for graft rupture and contralateral rupture after Anterior Cruciate Ligament reconstruction. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 21(8), 948-957.
- Schmitt, L. C., Paterno, M. V., Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2015).** Strength asymmetry and landing mechanics at return to sport after Anterior Cruciate Ligament reconstruction. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 47(7), 1426-1434.
- Tapasvi, S., & Shekhar, A. (2021).** Revision ACL reconstruction: Principles and practice. *Indian Journal of Orthopaedics*, 55(2), 263-275.
- Weitz, F. K., Sillanpää, P. J., & Mattila, V. M. (2020).** The incidence of paediatric ACL injury is increasing in Finland. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 28(2), 363-368.
- Wiggins, A. J., Grandhi, R. K., Schneider, D. K., Stanfield, D., Webster, K. E., & Myer, G. D. (2016).** Risk of secondary injury in younger athletes after Anterior Cruciate Ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, 44(7), 1861-1876.
- Wilczyński, B., Zorena, K., & Ślęzak, D. (2020).** Dynamic knee valgus in single-leg movement tasks. Potentially modifiable factors and exercise training options. A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 8208.
- Yeow, C., Lee, P. V. S., & Goh, J. C. H. (2010).** Sagittal knee joint kinematics and energetics in response to different landing heights and techniques. *The Knee*, 17(2), 127-131.

한 발 착지 시 전방십자인대 재건술 유무가 성인 남성의 하지 관절 각도 및 충격 흡수 패턴에 미치는 영향

김찬기¹, 박은비², 이형우¹, 전경규³

¹인천대학교, 박사과정

²인천대학교, 석사과정

³인천대학교, 부교수

[목적] 본 연구의 목적은 ACLR 유무에 따른 한발 낙하 착지 시 최대지면반력이 발생하는 시점에서 하지 관절 각도 및 충격 흡수 패턴의 차이 비교 및 분석하는 것이다.

[방법] 본 연구에는 성인 남성 40명이 모집되었다. 전방십자인대 재건 유무에 따라 ACLR군 19명(나이: 20.52±1.43세, 신장: 179.26±5.18cm, 체중: 74.91±6.29kg), 대조군 21명(나이: 21.42±1.61세, 신장: 174.97±6.83cm, 체중: 69.27±7.56kg)으로 분류되었다. 참가자들은 30cm 박스 위에서 한발 다리 착지를 수행하였다. 착지 시 지면 반력이 최대가 되는 시점에서의 운동학 및 운동역학적 변인의 차이를 분석하기 위해 독립표본 *t*-검정을 사용하였다. 모든 통계 결과에 대한 유의 수준은 $p=0.05$ 로 설정하였다.

[결과] 본 연구 결과, 하지관절 각도에 따른 엉덩 관절의 굴곡과 외전, 무릎 관절의 굴곡 외반에서 유의한 차이를 보였다 ($p<.05$). 그리고 한발 낙하 착지 시 운동역학적 변인인 최대 지면 반력, 하지 강성, 충격 흡수 시간에서는 두 그룹 간에 유의한 차이가 나타나지 않았다.

[결론] ACLR군은 대조군과 비교하여 운동학적으로 유의한 차이를 보였지만 운동역학적으로는 유의미한 차이가 발견되지 않았다. 두 그룹은 서로 다른 움직임으로 동일한 충격을 보였으며, 이러한 ACLR 그룹의 움직임은 ACL 재부상 위험을 증가시킬 수 있는 위험이 있다. 따라서 ACLR 그룹은 올바른 동작 훈련을 통해 재부상 위험을 감소시켜야 할 필요가 있다.

주요어

전방십자인대, 전방십자인대 재건술, 무릎 부상, 드롭 랜딩