

출처: <https://simtk.org/>

전방십자인대 부상에 관한 생체역학 연구 소개



문제현

한국스포츠정책과학원 스포츠과학실 연구위원
운동역학 전공
근골격계 모델링에 관심
jhmoon@kspo.or.kr

들어가는 글

전방십자인대 부상은 매우 치명적이다. 심각한 손상이 발생하면 재건수술을 시도하는데 80-90% 정도의 기능 회복률을 보이고 있다. 수술 후 3년 동안은 주축으로의 이동(pivot-shift)에 어려움이 있고 완치 후에도 재부상 비율이 25%에 육박한다.¹⁾ 또한 부상이 주로 발생하는 종목은 축구, 농구, 스키, 태권도 등 생

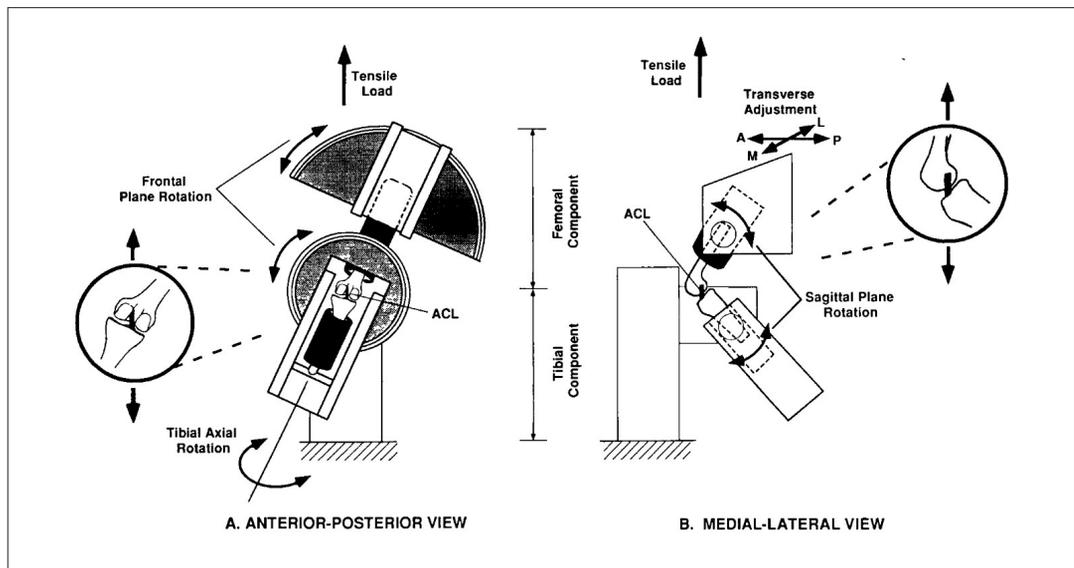
1) Palermo, M. V., Schmitt, L. C., Ford, K. R., Rauh, M. J., Myer, G. D., Huang, B., & Hewett, T. E. (2010). Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *The American journal of sports medicine*, 38(10), 1968-1978.

활체육이 활발한 종목들로 조사되고 있어 부상 발생비율은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 따라서 이 글에서는 전방십자인대 부상 기전을 규명하고 부상 방지를 위하여 어떠한 생체역학 연구들이 진행되고 있는지 알아보려고 한다.

사체연구

초기에 수행된 사체연구는 정적(static)이거나 준정적(quasi-static)인 상태에서 무릎관절의 굴곡과 회전에 따른 전방십자인대 길이 변화를 제시하는데 그쳤다. 이후 전방십자인대의 물리적 특성을 알아보려고 대퇴-전방십자인대-하퇴로 구성된 하지 사체(femur-ACL-tibia complex)를 30°로 굴곡시키고 외력을 가한 결과에 의하면, 22-35세는 1,602 N, 40-50세는 1,160 N, 60-97세는 495 N의 힘에서 전방십자인대가 파열되었다.²⁾

무릎관절의 굴곡뿐만 아니라 내/외전과 내/외측회전을 유도한 연구가 진행되었는데 외전과 내측회전으로 가한 외력이 내전과 외측회전 보다 전방십자인대 부하를 증가시켰다.³⁾ 위에 나열한 외에도 다양한 사체 연구를 통하여 얻은 실험결과는 후속연구로 수행되는 운동역학 및 근골격계 모델링 연구 분야에서 매우 중요한 기초자료로 사용되고 있다.



[그림 1] 전방십자인대의 물리적 특성을 평가하기 위한 실험장비의 개요도(Woo et al., 1991)

- 2) Woo, S. L. Y., Hollis, J. M., Adams, D. J., Lyon, R. M., & Takai, S. (1991). Tensile properties of the human femur-anterior cruciate ligament-tibia complex: the effects of specimen age and orientation. *The American journal of sports medicine*, 19(3), 217-225.
- 3) Markolf, K. L., Burchfield, D. M., Shapiro, M. M., Shepard, M. F., Finerman, G. A., & Slaughterbeck, J. L. (1995). Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *Journal of Orthopaedic Research*, 13(6), 930-935.

부상 사례 연구

들어가는 글에서 전술한 바와 같이 전방십자인대 부상은 스포츠 활동 중 가장 많이 발생한다. 따라서 경기 중 상황과 어떤 동작을 취하였을 때 부상이 발생하는지 조사해볼 필요가 있다. 핸드볼 경기 중 전방십자인대 부상이 발생한 20건의 영상을 분석한 연구에서는 방향전환 동작 12건, 점프 슈팅 후 한발 착지 동작 4건, 감속 2건, 러닝 1건, 충돌 1건으로 조사되었다. 이때 공통적으로 발견된 자세는 빠른 속도를 수반하여 무릎관절이 신전과 외전 된 상태로 경골이 내측 또는 외측회전 되었다고 보고하였다.⁴⁾ 이와 유사하게 핸드볼과 농구 경기에서 전방십자인대 부상이 발생하는 10건의 영상을 분석한 연구에 의하면 착지 후 0.4 sec 이내에 무릎관절에서 급격한 각운동과 최대 지면반력이 발생하였다. 무릎관절의 각운동은 10건의 부상 모두 외전과 내측회전으로 나타났다.⁵⁾ 이상과 같이 부상 사례를 조사한 연구결과는 사체연구를 통하여 얻은 무릎관절의 움직임과 전방십자인대 부하 관계와 일치하였으며, 단시간에 강한 힘과 함께 급격한 무릎관절의 움직임이 전방십자인대 부상에 주요한 원인이라 할 수 있다.



[그림 2] 전방십자인대 부상 발생 장면(Olsen et al., 2004)

4) 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.

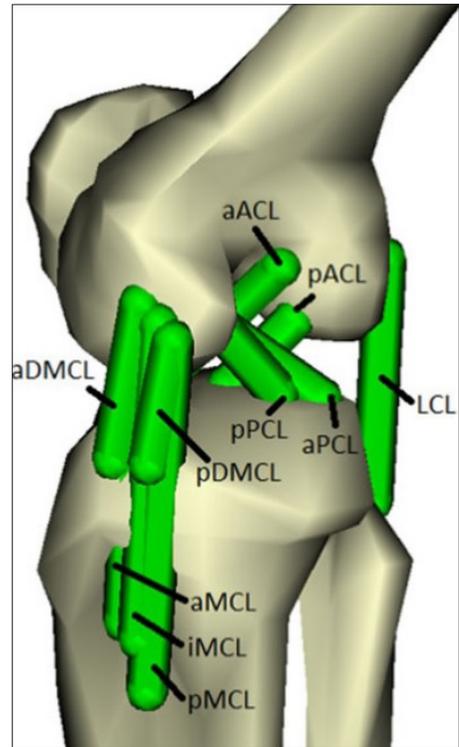
5) Koga, H., Nakamae, A., Shima, Y., Iwasa, J., Myklebust, G., Engebretsen, L., Bahr, R., & Krosshaug, T. (2010). Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *The American journal of sports medicine*, 38(11), 2218-2225.

스키종목 전방십자인대 부상 사례 연구는 3년 동안 월드컵 대회에서 발생한 20건을 분석한 연구가 대표적이다. 이 연구에서는 스키종목에서 발생할 수 있는 전방십자인대 기전으로 스키가 미끄러지면서 설면에 걸림(slip-catch), 체중이 뒤쪽에 실려 있는 착지(landing back-weighted), 그리고 동적인 스노플로우(dynamic snowplow)를 제시하였다. slip-catch와 dynamic snowplow에 의한 전방십자인대 부상은 턴 동작에서 바깥쪽 스키가 압력을 잃고 안쪽 엣지가 눈에 걸리는 상황에서 무릎관절 신전과 함께 외전 및 내측회전 된 자세에 가해진 외력에 의하여 발생한다. landing back-weighted은 점프 후 착지동작에서 체중이 뒤에 있는 상태로 스키 테일이 먼저 설면에 닿으면서 무릎에 작용하는 압력과 전단력에 의해 부상이 발생하는 것으로 보고되고 있다.⁶⁾

실험실 연구

실제 스포츠 현장에서 발생하는 부상 사례 연구에서는 그 당시의 상황과 자세를 설명할 수 있으나 무릎관절에 작용하는 힘을 정량적으로 파악할 수 없다는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하고자 실험실 연구에서는 전방십자인대 부상이 빈번하게 발생하는 방향전환, 한발 또는 두발 착지동작을 대상으로 지면반력, 무릎관절의 전단력, 모멘트, 및 대퇴근육의 근 활성도 등을 분석하고 있다. 이를 통하여 후방으로 작용하는 지면반력, 무릎관절의 전단력, 대퇴사두근의 강한 근 수축과 함께 작용하는 무릎관절의 내/외전 및 내/외측회전 모멘트가 전방십자인대 부하를 높이는 주요한 요인으로 제시되고 있다.⁷⁾

최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하여 대퇴와 하퇴 사이에 전방십자인대를 삽입한 후 부하를 추정하는 근골격계 모델링(musculoskeletal modeling) 연구가 진행되고 있다.⁸⁾ 아직까지는 모델에 대한 검증과 전방십자인대 부상 동작에 대한 적용이 많이 이루어 지지 않았지만 근골격계 모델링 연구는 기존 역동역학(inverse dynamics) 연구결과와 함께 세부근육에 대한 정량적 정보를 제공하여 전방십자인대 부상에 관한 폭 넓은 이해가 가능할 것이다.



[그림 3] 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 십자인대 모델(Xu et al., 2015)

6) Bere, T., Florenes, T. W., Krosshaug, T., Koga, H., Nordsletten, L., Irving, C., Muller, E., Reid, R. C., Senner, V., & Bahr, R. (2011). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in World Cup alpine skiing: a systematic video analysis of 20 cases. *The American journal of sports medicine*, 39(7), 1421–1429.

7) Yu, B., & Garrett, W. E. (2007). Mechanisms of non-contact ACL injuries. *British journal of sports medicine*, 41(Suppl 1), i47–i51.

8) Xu, H., Blawieck, D., & Merryweather, A. (2015). An improved OpenSim gait model with multiple degrees of freedom knee joint and knee ligaments. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 18(11), 1217–1224.

부상방지 연구

전방십자인대 부상 방지 방안에 관한 연구로는 크게 운동기술과 트레이닝 적용으로 구분할 수 있다. 무릎 관절의 신전은 슬개건(patella tendon)과 경골간(shaft of tibia) 및 전방십자인대의 각도를 증가시켜 긴장을 유발한다. 이 긴장을 완화 시키기 위하여 착지 동작에서 무릎관절의 굴곡을 유도하는 연성 착지 동작이 제시되었다. 이는 간단한 구두 설명, 비디오 시청 등 비교적 간단한 방법을 적용하여 무릎관절의 회전, 지면반력 및 추정된 전방십자인대 부하를 감소시키는 것으로 보고하고 있다.⁹⁾ 후속연구로 다양한 무릎보호대를 착용하여 연성 착지 동작과 유사한 효과를 기대하였으나 전방십자인대 부상과 관련이 있는 대부분의 요인이 착용하지 않은 조건과 통계적인 차이를 보이지 않아 운동기술의 중요성이 강조된다.¹⁰⁾

트레이닝 적용 측면에서는 여성 축구선수들을 대상으로 근신경(neuromuscular) 및 자기수용(proprioceptive) 훈련을 적용한 연구가 진행되었다. 1년차 1,041명, 2년차 844명의 선수가 근신경 및 자기수용 훈련을 실시하였고 1년차 1,905명, 2년차 1,913명은 기존 준비운동을 실시하였다. 각 팀의 지도자들에게 매주 부상 보고서를 받아 분석한 결과 전방십자인대 부상 발생률은 기존 준비운동 선수들에 비하여 1년차 88%, 2년차 74%가 감소하여 전방십자인대 부상 방지에 매우 효과적인 훈련방법임을 증명하였다.¹¹⁾

TABLE 1
Prevent Injury and Enhance Performance Program^a

Exercise	Distance	Repetitions/ Time
1. Warm-up		
Jog line to line	50 yd	1
Shuttle run	50 yd	1
Backward running	50 yd	1
2. Stretching		
Calf stretch	NA	2 × 30 s
Quadriceps stretch	NA	2 × 30 s
Hamstring stretch	NA	2 × 30 s
Inner thigh stretch	NA	2 × 30 s
Hip flexor stretch	NA	2 × 30 s
3. Strengthening		
Walking lunges	20 yd	2 passes
Russian hamstring	NA	30 s
Single-toe raises	NA	30, bilaterally
4. Plyometrics		
Lateral hops	2- to 6-in cone	30 s
Forward hops	2- to 6-in cone	30 s
Single-legged hops	2- to 6-in cone	30 s
Vertical jumps	NA	30 s
Scissors jumps	NA	30 s
5. Agilities		
Shuttle run	40 yd	1
Diagonal run	40 yd	1
Bounding run	45-50 yd	1

^aNA, not applicable.

[그림 4] 전방십자인대 부상 방지 훈련 프로그램(Mandelbaum et al., 2005)

맺음 글

지금까지 전방십자인대 부상 기전부터 부상방지 방안을 마련하기까지 진행된 주요 연구를 간략히 살펴 보았다. 과거의 연구들은 주로 부상 기전과 상황을 알아보았고 이를 통하여 얻은 지식이 비교적 최근에 진행되고 있는 부상방지 방안 수립 연구로 연결되고 있다. 앞으로도 아직 명확하게 밝혀지지 않은 부상 기전에 대한 연구가 진행되는 동시에 Mandelbaum 등(2005)의 연구와 같이 대규모의 엘리트선수와 생활체육인에게 부상방지 프로그램이 보급될 수 있도록 우리 스포츠과학자의 역할이 요구된다.

9) Leppänen, M., Pasanen, K., Kujala, U. M., Vasankari, T., Kannus, P., Äyrämö, S., Krosshaug, T., Bahr, R., Avela, J., Perttunen, J., & Parkkari, J. (2017). Stiff landings are associated with increased ACL injury risk in young female basketball and floorball players. *The American journal of sports medicine*, 45(2), 386–393.

10) Moon, J., Kim, H., Lee, J., & Panday, S. B. (2018). Effect of wearing a knee brace or sleeve on the knee joint and anterior cruciate ligament force during drop jumps: A clinical intervention study. *The knee*. In press. doi: 10.1016/j.knee.2018.07.017

11) Mandelbaum, B. R., Silvers, H. J., Watanabe, D. S., Knarr, J. F., Thomas, S. D., Griffin, L. Y., Kirkendall, D. T., & Garrett, W. (2005). Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up. *The American journal of sports medicine*, 33(7), 1003–1010.