

# 전방십자인대 부상요인과 부상기전 연구 방법

이 글에서는 슬관절의 기능에 중요한 역할을 하는 인대인 전방십자인대의 부상에 대해 소개하고, 전방십자인대 부상기전을 연구하는 여러 가지 생체역학 연구 방법의 동향에 대해 알아보기로 한다.

신충수 서강대학교 기계공학과, 교수

e-mail : cshin@sogang.ac.kr

## 전방십자인대 부상 및 연구

전방십자인대(anterior cruciate ligament)는 슬관절의 4대 인대 중 하나로 평균 길이는  $31 \pm 3\text{mm}$ 이며 대퇴과의 외측 면에서 시작하여 전하방으로 주행하는 다중의 섬유 다발로 이루어지며 부챗살 모양으로 산개하여 경골의 전면에 부착되어 있어 다축성의 응력에 저항할 수 있는 특성을 갖고 있다(그림 1). 전방십자인대는 주로 경골의 과도한 전방전이 및 회전을 제한하는 등 슬관절의 동적 안정성에 크게 기여한다.

전방십자인대 부상은 반월상 연골(meniscus)의 부상과 더불어 슬관절 부상 중 가장 흔하게 발생하며 주로 스포츠 활동, 교통사고 등에 의해 발생되고 있다. 북미의 통계에 의하면 일년에 십만 명 전후의 사람이 부상을 당하는 것으로 알려져 있다. 전방십자인대 손상은 슬관절 불안정성, 슬관절 무력감 등을 야기하여 환자들의 정상적인 생활이나 스포츠 활동에의 참여를 제한시키며, 보존적 치료 혹은 수술적 치료를 받은 경우에도 퇴행성 관절염을 조기에 발생시키는 것으로 알려져 있다.

전방십자인대와 관련된 최근의 연구 방향은 부상기전 연구, 부상방지훈련 연구, 전방십자인대 수술 및 예후에 관한 연구 그리고 전방십자인대 부상에 따른 퇴행성 관절염에 관한 연구 등으로 나누어 볼 수 있다.

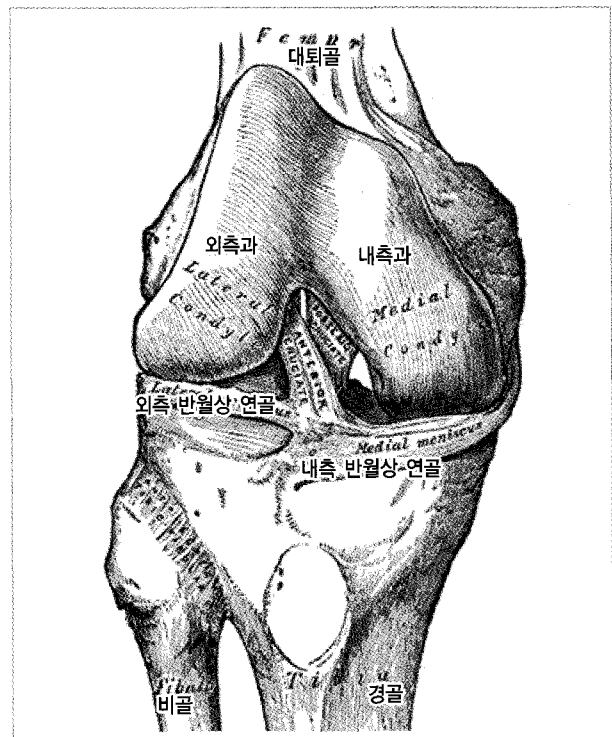


그림 1 슬관절의 전면 그림. 전방십자인대(anterior cruciate ligament)는 경골(tibia) 전면과 대퇴과의 외측면(femoral lateral condyle) 안쪽에 부착되어 있다.

이러한 연구들은 기계공학 연구자들이 운동학, 정형의 과학, 영상의학 분야의 연구자들과 공동으로 연구해야 하는 영역이라 할 수 있겠다. 이 글에서는 전방십자인대 부상기전 연구를 위한 방법에서 특히 기계공학자들의 역할이 많이 요구되는 연구 접근방법의 동향에 대해

서 알아보도록 하겠다.

부상기전 연구를 위해서는 실제로 부상이 발생하는 상황을 명확히 이해하는 것이 필요하며 여러 가지 요인이 있을 수 있기 때문에 부상 후 임상적 진단과 부상기전을 연계시키는 것이 필요하다. 연구에 사용되는 대표적인 방법으로 부상환자 인터뷰, 부상 당시 상황이 촬영된 영상 분석, 슬관절의 의료 영상(예: MRI, 관절경)을 이용한 임상적 연구, 인체 실험(in vivo study), 사체 실험(cadaver study), 수학적/공학적 모델을 이용한 시뮬레이션 등이 있다.

### 전방십자인대 부상기전의 연구 방법

#### 인터뷰

부상기전을 연구하는 가장 기본이 되는 방법으로 부상환자, 운동 코치, 운동 의료팀 등을 인터뷰하는 것이다. 설문조사 형식을 이용하므로 쉽게 자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 인터뷰 방법을 이용한 연구를 통해, 스포츠 종류에 따라 그 비율은 상이하지만 전방십자인대 부상이 상대방과 접촉하는 상태에서 발생하는 접촉성 부상보다는 비접촉성 상태로 발생하는 경우가 두 배 이상 많다는 것이 밝혀졌다. 뿐만 아니라 남성보다는 여성의 부상률이 수배 이상 높다는 것도 밝혀졌는데 이러한 발견들은 이후에 부상기전 연구 방향에 많은 실마리를 제공하였다. 하지만 인터뷰의 단점은 부상 자체가 매우 짧은 시간에 발생하므로 어떤 시점에서 발생했는지 정확히 알기 어려우며, 환자들이 정확하게 부상 상황을 기술해내기란 매우 어려워서 그 기저에 깔린 부상기전을 연구하는 단서를 제공하는 데 쓰이며 부상방지 기술 개발 등에 이용하기에는 한계가 있다.

#### 의료 영상을 이용한 임상 연구

최근에 의료영상 기술의 발달로 전방십자인대 부상 및 주변 조직 부상 여부에 대한 진단이 용이해졌다. MRI나 관절경을 이용하여 전방십자인대 부상과 주변 조직, 즉 반월상 연골, 내측부 인대(medial collateral ligament), 무릎연골(articular cartilage)의 상태 등을 조사함으로써 임상연구의 결과들은 부상기전에 대한 가설, 병리학 연구 등에 이용되어왔다. 특

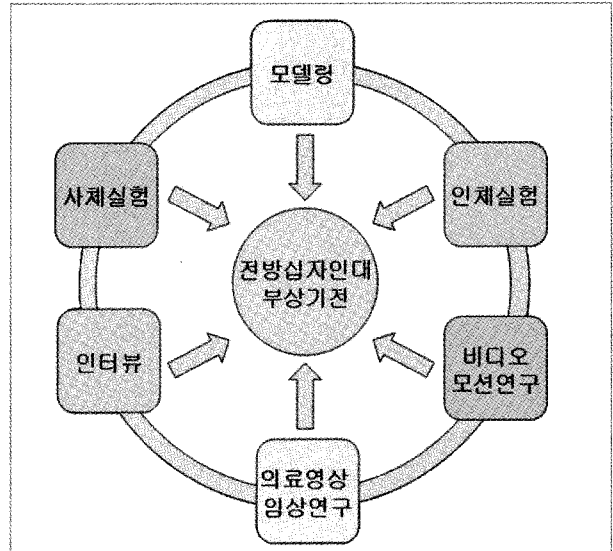


그림 2 전방십자인대 부상기전 연구의 방법: 각각의 방법들이 장단점을 가지고 있으며 복잡한 부상기전 규명을 위해서는 기계공학, 운동학, 영상의학, 정형외과학의 공동 연구가 요구된다.

히 전방십자인대 환자들에게 대퇴골의 외측과(lateral femoral condyle)와 경골의 외측후방(posterolateral region of the tibia)에 골좌상 등이 흔하게 발견된다는 사실에 입각하여 슬관절의 외반(valgus)이 부상기전과 밀접한 관련이 있으리라고 제시된 바 있다. 주요한 단점으로는 진단에서 밝힌 부상 여부가 전방십자인대의 파열 당시에 생긴 것인지, 파열의 부산물로 이후에 생긴 것인지 혹은 이전에 존재했는지에 대해 정확히 이야기 해주기 어렵다는 것이다. 또한 의료영상 분석만으로는 부상을 야기하는 슬관절의 자세한 생체역학, 즉 어떠한 힘과 모멘트, 동작에서 부상이 실제로 발생하는지에 대해서 밝히기에는 여전히 어려움이 있다. 향후에 임상연구에서는 부상 당시 촬영된 비디오 분석이나 환자 인터뷰 결과와 연계하여 분석하거나, 종단연구(longitudinal study)를 이용하여 인과관계를 밝혀거나 일부 부상기전을 배제할 수 하는 등 전방십자인대 부상기전 이해도를 높이는 데에 기여할 수 있을 것이다.

#### 비디오를 이용한 모션 연구

스포츠 경기 시에 촬영된 비디오를 보고 부상기전을 연구하는 방법으로, 예를 들면 스키어에게 발생하는 전방십자인대 부상기전 중에 유령발(phantom foot) 기전에 의한 것이 비디오 모션연구를 통하여 연구, 보고된 바 있으며 이후에 스키 장비 설계의 개선 및

방지 프로그램 등에 이용되어 부상예방효과를 나타낸 바가 있다. 2차원 비디오를 보고 관절의 운동 상태를 예측하는 데는 한계가 있지만 최근 수 개의 카메라에 찍힌 영상을 이용하여 모델을 만든 후 매칭시키는 기법을 이용하여 관절의 운동을 기술하는 방법 들이 보고되고 있다. 비디오 영상을 이용한 방법의 단점은 관절운동 측정의 부정확성이라고 할 수 있으며, 본디 비접촉성 부상이 많은 전방십자인대 부상의 경우 정확한 부상시점을 알아내기도 어렵다는 데 있다. 또한 그 연구 대상의 샘플이 운동선수들로만 편향될 수 있는 단점도 있다. 비디오 영상을 이용한 연구는 운동학의 중요한 연구 도구인 모션 캡처(motion capture) 방법과 긴밀하게 연계되어 있으며, 기존의 모션 캡처 방법은 마커(marker)를 피실험자에게 부착한 후에 촬영을 한 반면, 최근에는 마커를 붙이지 않고 촬영하는 방법들이 개발되고 있으며, 향후에 정확도가 개선된다면 부상기전을 연구하는 데 큰 기여를 할 수 있으리라고 예상된다.

**인체 실험**

실험실 환경하에서 이루어지는 인체실험(in vivo study)을 통해서도 스포츠 경기 비디오 분석보다는 훨씬 정확하게 관절의 움직임이나 하중 등을 측정할 수 있다. 전방십자인대 부상을 야기하는 동작과 유사한 점프 랜딩(jump landing), 피보팅(pivoting), 사이드 스텝핑(side stepping) 시에 발생하는 움직임에서 고위험군 여성과 저위험군 남성을 비교하는 연구 결과 등이 주로 보고되고 있다. 하지만 실제로 부상은 실험실의 비교적 안전한 부상 모사 동작보다 훨씬 복잡하거나 빠른 동작, 높은 하중 하에서 발생하므로 실험 모션과 실제 부상 모션을 비교하는 데에는 한계가 있다. 정확도 측면에서도 전방십자인대 부상과 밀접한 관련이 있다고 믿어지는 경골의 내/외회전이나 외반/내반 회전에 대한 정확도는 여전히 부족한 상태이며 여기에는 뼈와 피부와의 상대운동, 마커 위치 부착의 신뢰도, 측정 장비 잡음인자 등 여러 요인들이 정확한 측정을 저해한다. 하지만 종단연구방법을 계획하여 인체실험을 실시한 결과, 착지 동작 시 외반 모멘트가 낮은 여성 운동 선수들이 시즌 중에 부상이 덜 발생한다는 것이 밝혀진 바 있다.

스트레인 게이지를 이용하여 인체의 움직임에

의해 발생하는 전방십자인대의 스트레인을 직접 측정하는 연구(in vivo strain measurement)가 보고된 바 있다. 이것은 전방십자인대의 스트레인을 가장 사실적으로 측정이 가능한 방법이기도 하지만, 무릎을 절개하고 작은 섬유다발에 게이지를 삽입해서 측정하는 실험이라 윤리적 문제에 의한 논란이 있으며, 무릎 내부에서 게이지가 뼈와 충돌하는 문제 등으로 인해 측정 상의 기술적 제약이 많으며, 실험할 수 있는 동작도 제한적이다. 기본적으로 인체실험은 부상이 발생할 수 있는 위험한 동작을 재현하기는 불가능하다. 최근에 초음파 촬영술(ultrasonography)이나 시네 페이즈(cine-phase) MRI 등을 이용하여 비절개적인 방법으로 조직의 스트레인을 측정하는 방법 등이 제시된 바 있으나 정확도에 대한 검증도 부족하고 운동 동작을 촬영하기에는 아직 적용이 제한적이다.

**사체실험**

사체실험(cadaver study)을 이용한 연구도 지난 수십여 년 간 많이 시행되어 왔는데 슬관절을 실험장치를 이용하여 일부 자유도를 남기고 고정시킨 후에 한 방향 혹은 여러 방향의 하중을 가하고 슬관절의 움직임이나 전방십자인대에 작용하는 스트레인, 힘 등을 측정하며, 혹은 로봇을 이용하여 전방십자인대의 파열 전후의 운동을 분석하여 전방십자인대에 작용하는 힘을 계산한 실험들이 대표적이라고 할 수 있다. 이러한 제어된 실험들을 통해서 슬관절에 작용하는 여러 형태의 하중에 대해 전방십자인대가 1차적 저항체 혹은 2차적 저항체가 되는지 밝혀진 바 있다. 그러나 이러한 사체실험은 주로 낮은 하중에 대한 반응이며 준정적 하중에 대한 응답이므로 복잡하고 단시간에 발생하는 부상기전에 대해 올바른 해답을 주기에는 역시 부족함이 따른다. 사체실험 중에서는 좀더 복잡한 실험장치를 이용하여 실제로 전방십자인대가 사두거근(quadriciceps)의 과도한 수축에 의해 파열되는 것을 모사한 연구도 있고 사두거근, 뒤넙다리근(hamstrings)과 장딴지근(gastrocnemius)을 모사한 실험에 의한 연구도 최근 보고된 바가 있다. 이러한 사체실험의 가장 큰 단점은 근육의 효과를 충실하게 재현하지 못한다는 것이고 대체로 준정적 하중에 대한 응답이라는 것 등이다. 하지만 최근에

실제 조직을 이용한 실험으로 지속적으로 보다 실제 부상 상황을 충실하게 모사할 수 있는 실험들이 계속 시도되고 있다.

### 모델링

컴퓨터를 이용한 수학적 혹은 공학적 모델이 지속적으로 개발되어 왔으며 최근에는 부상의 상황을 최대한 유사하게 모사하려는 복잡한 모델들이 개발되고 있는 추세이다. 이러한 모델들은 개발된 목적에 따라서 홀바디(whole body) 모델, 하지 모델, 슬관절 모델, 또는 전방십자인대 모델 등 그 스케일이 다르고 확률 모델, 강체 모델 혹은 FEM 모델 등 상세함과 종류도 상이하다. 이러한 컴퓨터 모델들은 대개 정확하게 관절의 운동학, 힘, 모멘트 등의 정보를 제공해줄 수 있으며, 복잡한 하중을 슬관절에 가할 수 있고, 특정한 방향의 전단력이라든지 모멘트의 효과를 다른 요소들과 분리하여 그 효과를 예측할 수 있게 하는 장점이 있다.

최근에 보고된 모델을 이용한 연구로는 인체 실험의 사이드 스텝핑(side stepping)이나 착지 동작을 모사하는 3차원 홀바디 모델에 의해 사두거근의 수축에 의한 경골 전방 전위보다 외반 모멘트가 전방십자인대 부상기전에 더욱 중요하다고 발표된 바 있고, 인체 실험에서 측정된 근전도(Electromyography) 신호를 이용하여 시뮬레이션의 입력치로 이용한 방법도 제시된 바 있다. 작은 스케일의 모델로는 전방십자인대의 기능적 다발을 분류하여 FEM 모델을 개발하여 응력계산을 하거나, 회전예에 의해 전방십자인대의 대퇴골 내부와의 충돌에 따른 영향이라든지 하는 복잡한 요소 등을 연구도 보고된바 있다.

모델링을 이용한 방법의 단점은 복잡한 모양과 근골격계 컨트롤을 모사하기 위해 최근 모델이 점차 복잡해지고 있으며 많은 가정과 단순화가 필요하다는 점

이다. 또한 가장 큰 어려움은 모델의 검증인데, 모델의 검증과정은 개발보다 중요할 정도로 필요하지만 많은 모델링 연구 들은 이러한 검증 절차를 거치지 않거나, 적합하지 않은 방법으로 검증을 하여, 모델을 이용한 적용 및 예측에 많은 제한을 가지고 있다.

복잡하고 동적인 하중 하에서 발생하는 전방십자인대 부상기전을 연구하기 위해서는 3차원 운동을 정확히 나타낼 수 있는 모델링 방법이 많은 이점을 가진 것으로 보인다. 최근의 개발 동향을 보면 MRI나 CT 자료를 이용하여 뼈나 연골, 인대, 근육 등의 복잡한 기하학적 형상을 3차원으로 재건하며, 각 조직에 상이한 물성치와 구성 방정식, 운동방정식 등을 할당하고 여기에 인체 실험이나 사체실험에서 얻은 자료도 입력치로 적용하여 부상기전을 밝히는 데 이용하려고 하고 있다. 이러한 요구로 인해 생체역학의 기계공학적 접근이 더욱 요구되고 있는 실정이다.

### 맺음말

이 글에서는 대표적인 스포츠 부상 중의 하나인 전방십자인대 부상의 부상기전 연구방법에 대해 알아 보았다. 하나의 방법만으로는 복잡한 부상기전을 규명하기에는 부족하며, 각각 방법들은 장단점을 가지고 있어 부상기전 이해와 부상 방지 훈련 프로그램, 수술 및 예후 연구, 관절염 연구 등에 필요한 통찰력과 가이드 라인을 제시해줄 수 있으므로 모두가 지속적인 연구개발이 필요한 방법들이라고 할 수 있다. 최근의 추세는 여러 가지 방법들을 연계하여 부상기전을 연구하는 것이라 할 수 있으며, 특히 모델링 방법은 인체실험, 모션 연구, 의료영상 등의 방법을 모두 병합하여 부상기전 이해를 규명하고 주변 연구들에게도 통찰력을 제공할 수 있는 연구가 진행될 것이다.

### 기계용어해설

#### 퍼말로이(Permalloy)

투자율, 내마모성, 전성, 연성 등이 모두 크고, 전류계판, 해저전선 등에 널리 쓰이는, 니켈 78.5%를 함유한 니켈과 철의 합금.