

슬관절의 퇴행성관절염 발생과 보행 역학의 관계

퇴행성관절염은 많은 인구가 앓고 있는 노인성 질병 중의 하나로 기계적인 원인과 생물학적인 원인에 의해 발생하고 진행한다고 보고되고 있다. 특히 슬관절은 보행 중에 많은 하중을 받고, 퇴행성관절염이 가장 흔한 관절이다. 이 글에서는 이전 보고들과 현재 연구 결과들을 바탕으로 보행역학과 퇴행성관절염에 대해 알아본다.

구승범 중앙대학교 기계공학부, 조교수

e-mail : skoo@cau.ac.kr

불혹의 나이를 넘어서면 슬슬 무릎에서 소리가 나고, 빠근하며 어떨 때는 통증을 느끼기 시작한다. 슬관절의 퇴행성관절염은 많은 사람들이 피해 갈 수 없는 노화의 현상 중 하나이다. 일단 걸리면 고통이 조금씩 증가하다가 최후에는 인공 관절 수술을 해야만 하는 이 질병은 25세 이상 인구의 약 14%, 65세 이상 인구의 약 34% 정도가 앓을 정도로 흔한 질병이다(Lawrence, 2008). 하지만 슬관절 퇴행성관절염에 일찍 걸리는 사람도 있고, 평생 걸리지 않는 사람도 있고, 걸린 사람 중에도 빨리 진행되는 사람이 있고, 서서히 진행되는 사람도 있다. 진행을 늦추고, 고통을 덜어 주는 여러 가지 건강 보조 식품들과 약물 등이 있지만 마땅한 치료 방법은 아직 알려진 것이 없다.

퇴행성관절염의 발생과 진행 원인은 생물학적인 원인, 유전학적인 원인 등 여러 가지가 있지만, 다른 관절염들과 달리, 두 뼈의 상대적인 운동과 충격으로 인한 기계적인 응력이 다른 원인들보다 큰 역할을 한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이를 달리 생각하면 슬관절의 기계적인 상태를 잘 이해하고, 이 상황을 바꿀 수 있다면 퇴행성관절염의 발병률을 낮추고, 진행 속도도 늦출 수 있을 가능성이 크다.

퇴행성관절염은 쉽게 말하면 뼈 끝단에 붙어 있는 관절연골이 닳아 없어지고, 나중에는 뼈까지 닳게 되는 질병이다. 건강한 관절연골의 표면은 마찰 계수가 0.001 이하로 상당히 부드럽고 매끈매끈하다. 관절연

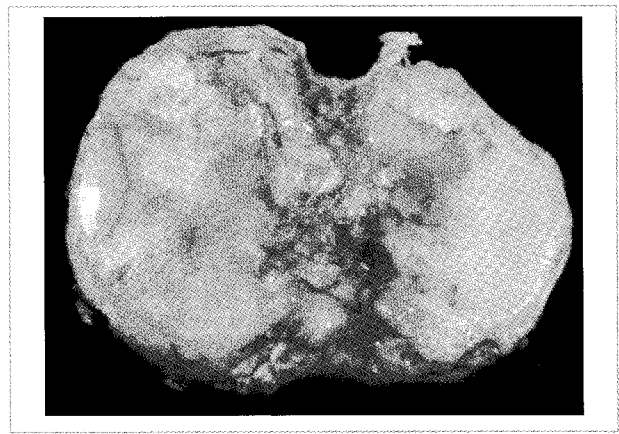


그림 1 퇴행성관절염 말기의 인공관절수술을 받은 환자의 경골 상부 모습 - 관절연골이 거의 모두 없어지고, 그림 왼쪽에는 뼈까지 닳은 상태를 보여준다.

골의 60% 정도는 물이고, Chondrocyte라는 세포와 Collagen과 Glycosaminoglycan(GAG)이라는 고분자가 대부분을 이루고 있다. 관절연골은 Collagen과 GAG가 복잡하고 단단하게 엉켜 있고, 물 분자를 힘껏 끌어 당기고 있어서, 큰 하중이나 충격을 받더라도, 이를 잘 흡수하고 분산해준다. Chondrocyte는 기계적인 응력 상태에 따라서 동화작용을 하기도 하고 이화작용을 한다고 보고되고 있다. 정상적인 상태에서는 이 동화작용과 이화작용이 균형을 이루고 있어서 관절연골이 건강하게 유지 되지만, 여러 가지 기계적인 원인으로 인해 이 균형이 깨질 수 있다. 그 중에는 외상(Trauma)에 의한 관절 연골 표면에 미세 크랙이 발견하면서 고분자들 그물을 망가뜨리고 이로 인해

Chondrocyte의 이화작용이 증가를 하면서 퇴행이 진행한다는 이론도 있고, 관절의 불안정성 증가 또는 운동 변화로 인해 Chondrocyte 주위의 전단 응력과 법선 응력 성분의 변하고, 이 때문에 이화작용이 증가한다는 이론, 관절연골 아래에 있는 뼈가 경화(Sclerosis)되면서 그 위에 있는 관절연골의 응력 상태가 바뀌어서 Chondrocyte의 이화작용이 증가한다는 이론, 그 외 노령화, 몸무게 증가로 관절연골의 구조 자체가 부서져 퇴행성관절염이 발생 및 진화한다는 이론 등이 있다.

슬관절의 기계적인 상황의 변화가 항상 나쁘게 작용하는 것만은 아니다. 건강한 어린이들을 대상으로 한 실험에서 활동성이 높은 아이들이 활동성이 낮은 아이들보다 더 두꺼운 관절연골을 가지고 있었고, 이 아이들을 시간을 두고 관찰했을 때 활동성이 높은 아이들의 관절연골의 부피 증가율이 활동성이 낮은 아이들보다 높았다. 즉 적당한 기계적인 충격을 주면 건강한 연골을 유지시켜 줄 수 있다는 것이다.(Jones, 2003a, Jones, 2003b)

적절한 기계적인 응력과 관절의 움직임이 건강한 관절연골을 유지시키고, 퇴행성관절염의 진행을 늦추는 데 중요하다는 것은 여러 임상적인 보고를 통해서 알 수 있다. 하지만 슬관절의 기계적인 상황에 따라서 관절연골이 어떻게 적응을 하는가에 대한 체계적인 임상 실험은 아직 부족한 현실이다. 이 글에서는 본인이 지난 수년간 했던 슬관절 기계적 하중과 관절연골의 적응에 대한 임상 실험을 간단히 소개한다.

보행은 우리가 살면서 가장 많이 하는 반복 행동이고, 슬관절은 이로 인해 평생 동안 엄청난 양의 반복 하중을 받게 된다. 우리가 걷는 모양은 비슷하게 보이지만, 각 관절의 움직임을 자세히 살펴보면 지문과 같이 각 사람마다 고유한 관절 움직임을 가지고 있다. 슬관절은 보행 시 자기 몸무게의 3배 정도의 힘을 지탱하고, 이 관절에 있는 대퇴골과 경골은 6자유도의 복잡한 상대운동을 할 수 있다. 또한 슬관절 주위에는 10개 이상의 큰 근육들과 다수의 인대가 붙어 있어 복잡한 운동을 하면서도 안정성을 준다. 보행역학(Gait Analysis)에서는 모션캡처시스템과 지면 반력측정장치를 이용하여 슬관절의 6자유도 운동(3 Rotations & 3

Translations)과 3축 방향의 힘과 모멘트를 측정할 수 있다. 여기서 얻어지는 힘과 모멘트는 Inverse Dynamics 방법을 사용해 계산 해낸 외부 힘이다.(Andriacchi, 2005)

슬관절의 모멘트 중에 외전/내전 모멘트가 있는데 이것은 슬관절을 정면에서 보았을 때 시계방향/반시계방향으로 들어주는 모멘트이다. 보행 중에 지면 반력은 몸의 무게 중심(배꼽 정도)을 향하기 때문에 슬관절은 주로 내전 모멘트를 받게 되고, 이로 인해 슬관절 내측의 하중이 외측의 하중보다 높게 된다. 이 내측과 외측의 하중을 직접 측정하거나 계산할 수 있다면 좋겠지만, 슬관절은 많은 수의 근육과 인대가 있는 잉여(Redundant) 시스템이기 때문에 슬관절 내부의 하중을 직접 아는 것은 쉽지 않다. 다행스럽게도 슬관절 내측과 외측의 하중 비율은 우리가 측정할 수 있는 외부 Adduction 모멘트와 정비례 관계에 있다(schipplein, 1991). 슬관절 자기공명영상(MRI) 이미지를 이용하여 슬관절 관절연골의 3차원 모델을 만들고, 내측과 외측 관절연골의 두께 비율을 알 수 있다. 슬관절 부상이 없는 50세 미만의 피험자들을 대상으로 관찰을 하였을 때 정상 속도 보행 중의 최고 내전 모멘트와 내/외측 연골의 두께 비율은 중요한 상관관계가 있었다. 생물학적인 상태가 같은 연골에서 내측과 외측의 두께의 비율은 내측과 외측의 하중의 비율과 상관관계가 있었다. 이것은 건강한 연골인 경우 하중이 높을수록 두꺼운 연골을 유지할 수 있다는 것을 의미한다. 슬관절에 이미 퇴행성관절염이 진행 중인 피험자들을 대상으로 관찰을 했을 때는 보행 중 최고 내전 모멘트와 내/외측 연골의 두께 비율은 중요하게 역비례 관계에 있었다. 즉, 퇴행성관절염이 있는 상태에서는 높은 하중은 관절연골의 퇴행과 관련이 있다는 이전의 연구들과 같은 결과를 보였다. 이 연구는 관절연골의 두께가 정상 시 관절이 받는 기계적인 하중과 밀접한 관계에 있다는 것을 보여주는 것이다.(Andriacchi, 2004, Koo, 2007)

슬관절의 중심에 있는 전방십자인대는 후방십자인대와 더불어 대퇴골과 경골을 단단히 붙잡아 주고, 이 관절의 전후방 이동 안정성과 상하축 회전 안정성을 유지해준다. 전방십자인대는 농구, 축구, 스키 등 스포츠 활동 시 흔하게 부상을 입고, 파열되는 조직이다. 두

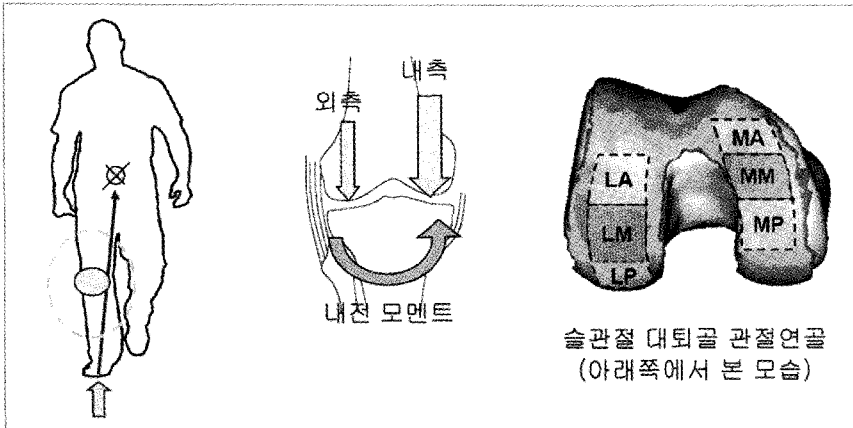


그림 2 보행 중 지면 반력은 몸의 중심을 향하고, 슬관절은 대체로 내전 모멘트를 받는다. 내전 모멘트는 내·외측 하중 분포와 정비례하고, 이 하중 분포는 관절연골의 두께 분포와 상관관계가 있었다.

뼈를 단단하게 잡고 있던 전방십자인대가 파열되면 환자들은 슬관절의 움직임이 이전과 다르다는 것을 경험하게 된다. 이러한 환자들을 관찰하면 전방십자인대가 파열된 후 12년 후에는 약 51%가 방사선 이미지에서 퇴행성관절염의 징후가 관찰된다. 이 경우의 퇴행성관절염 발생 원인에 대해서도 여러 가지 이론들이 있다. 전방십자인대 파열 시 관절연골 표면의 과도한 충격으로 미세 크랙이 발생하고, 이 크랙이 발전하여 퇴행성관절염을 일으킨다는 이론, 십자인대 파열로 인해 생물학적인 이상이 생겨 근처 조직들이 생물학적으로 질병에 걸린다는 이론, 슬관절의 불안정성 증가와 이로 인한 근육들의 과도한 수축으로 내부 하중이 늘어나 관절연골 구조가 망가진다는 이론 등이 있다. 전방십자인대 파열 환자의 슬관절에서 일어나는 기계적인 접촉 부위의 변화와 이로 인한 응력 상태의 변화가 퇴행성관절염의 발생에 큰 원인을 제공한다고 생각이 되지만 이에 대한 체계적인 접근이 부족하였다.

한 쪽 슬관절 전방십자인대가 파열된 환자들 중 아직 퇴행성관절염의 징후가 발견되지 않은 환자들을 대상으로 모션캡처시스템을 이용하여 보행 시 슬관절 운동 모습을 자세히 관찰해 보았다. 슬관절의 세밀한 6자유도 움직임을 측정하기 위하여 미국 스탠포드 대학교에서 개발된 Point Cluster Technique를 이용하였다(Andriacchi, 1998). 환자의 정상인 슬관절과 다친 슬관절의 보행 시 움직임을 비교했을 때 피험자들 중 절반은 대퇴골이 경골에 대해서 전방 이동 양상을 보였고, 나머지 절반은 후방 이동 양상을 보였다. 즉, 정상인 슬

관절에 비해서 다친 슬관절에서는 보행 시 대퇴골과 경골이 닿는 부위가 전방 또는 후방으로 이동하는 것이 관찰되었다. 이것은 전방십자인대 파열로 인한 슬관절의 불안정성을 주위 근육들이 잡아 주기 위해서 낮은 보상(Undercompensation) 또는 높은 보상(Overcompensation)한 결과로 보인다. 이 환자들을 대상으로 고해상도의 슬관절 자기공명영상 이미지를 얻고, 경골

관절연골의 3차원 모델을 만든 후에, 정상 슬관절의 관절연골 두께 분포와 다친 슬관절의 관절연골 두께 분포를 비교해 보니, 대퇴골 전방 이동 환자 그룹은 경골 연골의 후방 부분이 더 얇아졌고, 대퇴골 후방 이동 환자 그룹은 경골 연골의 전방 부분이 더 얇아졌다. 즉, 접촉과 하중이 줄어든 부분에서 관절연골의 초기 퇴화가 관찰되었다. 보통 상식으로는 접촉과 하중이 많은 부분에서 기계적인 퇴행성관절염이 발생하리라 생각되지만, 이 임상 실험에서는 정반대의 결과가 관찰되었다. 퇴행성관절염이 얼마만큼 진행되어 관절연골의 구조가 연약해지고, 관절연골 표면이 거칠어지기 시작하면 접촉과 하중이 많은 부분에서 기계적인 파괴가 더 많이 일어날 것이라는 것은 직관적으로 이해가 되는 부분이다. 하지만 퇴행성관절염의 초기에 기계적인 하중은 관절연골의 구조적인 면보다는 Chondrocyte의 대사와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. Chondrocyte는 생리학적 하중 상태에서 동화작용과 이화작용이 균형을 이루어 구조를 지탱하는 물질을 보충 및 제거한다. 이러한 생리학적 하중이 줄어들게 되면 Chondrocyte의 활동 변화로 퇴화가 시작될 수 있다. 대표적인 임상 실험의 예로, 척수 마비로 인해 하반신에 전혀 하중을 줄 수 없는 환자들을 대상으로 슬관절 연골들의 두께 변화를 1년간 조사한 바에 따르면 슬관절의 모든 연골들의 평균 두께가 감소하였고, 경골의 외측 연골의 경우 약 0.3mm까지 감소하였다.

관절연골과 기계적인 응력의 관계를 연구한 여러 문헌들과 본인의 연구를 종합해 보았을 때, 건강한



그림 3 슬관절의 전방십자인대가 파열된 환자의 보행 중 전후방 이동과 회전을 관찰해 보니, 일부는 대퇴골이 경골 기준으로 전방으로 이동하였고, 일부는 후방으로 이동하였다. 이 두 그룹은 경골 관절연골의 초기 퇴화의 위치가 서로 달랐다.

관절연골에서는 생리화적인 하중으로 인한 기계적인 응력이 Chondrocyte가 이화작용과 동화작용을 균형을 이루는 데 필요한 외부 환경을 만들어주고, 또한 긍정적인 영향을 주어서 건강하고 두꺼운 연골을 유지할 수 있도록 도와 준다. 이러한 생리화적인 하중이 줄어들게 되면 Chondrocyte의 이화작용이 증가하여 관절 연골의 두께가 감소하고, 퇴화가 시작될 수 있다. 관절연골의 구조나 표면이 망가진 상태에서 높은 하중을 주게 되면 이는 구조와 표면의 기계적인 파괴(wear and

tear)를 일으키고 퇴화를 가속시키는 역할을 할 수 있다. 물론 이 과정에서는 기계적인 하중과 Chondrocyte 그리고 고분자들의 복잡한 상호작용이 있다.

평생 동안 건강한 관절을 유지하는 것은 삶의 기본적인 행복과 직결될 것이다. 이를 위해서는 관절 연골의 상태를 분석하고, 관절의 기계적인 하중 상태를 조절하는 것이 하나의 방법일 것 같다. 이 두 부분 모두 정확한 분석과 조절을 위해서 앞으로 많은 연구와 노력이 수반되어야 하는 부분이다.

기계용어해설

충격용접(Percussive Welding; 衝擊鑄接))

합하고자 하는 2개 용접선의 맞댄 부분에 순간적으로 아크를 발생시켜 인접부분이 용융상태가 되는 동시에 양쪽 모재를 충격으로 압착시키는 방법.

성능곡선((Performance Curve; 性能曲線)

터보형 펌프에서는 회전속도, 전양정, 토출량 등을, 펌프 수차에서는 출력, 유량, 회전수 등을, 송풍기 및 압축기에서는 가스량, 압력, 축동력 등을 그래프 상에 나타낸 곡선.

펠턴 수차(Pelton Wheel)

원판의 주위에 다수의 버킷을 배열하고, 노즐로부터 분출한 물이 버킷에 부딪혀 수차를 회전시키는 방식의 수력 터빈.

진자 펌프(Pendulum Pump)

미끄럼 전자기구를 응용한 것으로, 회전자가 실린더 내벽에 접하여 회전운동을 하여 액체를 한쪽에서 다른 쪽으로 송출하는 회전 펌프의 일종.