

# 기계공학과 보행분석

이 글에서는 기존의 운동학적(kinematics) 관점에서 주로 수행되어 오던 보행분석을 기계공학적으로 접근함으로써 보행특성에 대한 이해를 높인 사례들에 대해 소개하고자 한다.

박수경 KAIST 기계공학과, 부교수

e-mail : sukyungp@kaist.ac.kr

기계공학적인 보행분석이라고 하면, 언뜻 보행분석하는 기계를 개발한다거나, 보행분석을 통해 보행보조기 등의 기기개발을 수행

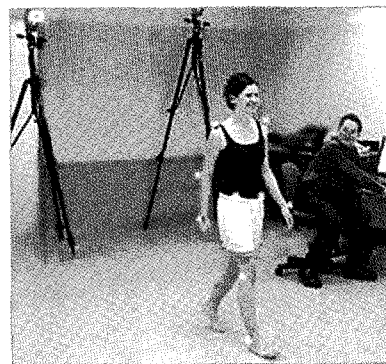
한다는 생각을 떠올리게 된다는 사람들이 많다. 이는 다분히 기계공학이 주는 이미지가 기계(machine)를 만들고 분석하는 학문이라는 제한적 선입견을 주기 때문이라고 생각한다. 역학(mechanics)과 공학(engineering)이라는 용어가 합쳐진 기계공학(mechanical engineering)은 역학적 원리를 적용하고 연구하는 공학이라는 의미에서 기계(machine)공학보다는 ‘역학공학’으로 번역하였어도 좋았겠다라는 생각을 해 본다. 역학이란 힘과 운동과의 관계를 규명하는 것이므로, 따라서 이 글에서 소개하고자 하는 ‘기계공학적인 보행분석’이란 보행 주기 동안 인체에 어떠한 힘이 작용하여 운동을 발생시키는가를 해석하고 이로부터 보행의 원리에 대해 이해하는 것을 의미하는 뜻으로 사용하였다.

보행분석이란 보행주기 동안의 각 관절, 즉 고관절, 슬관절, 족관절의 정면, 측면 그리고 횡단면상의 3차원 움직임을 측정하고, 이를 통하여 보행의 이상 유무를 진단하고 평가하는 검사로 관절의 운동학(kinematics)적 측정을 중심으로 해석이 이루어진다. 피험자는 보행분석실 안에 설치된 카메라가 인식할 수 있는 광학마커를 각 관절에 부착하고 정해진 경로를 걷게 되며, 연구자는 측정된 관절각의 보행주기 내에서의

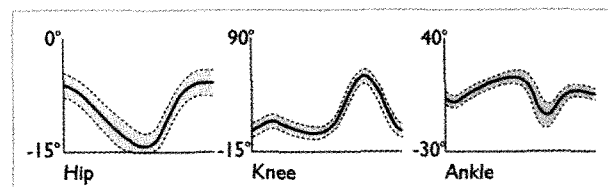
보행분석은 주로 관절운동을 고찰하는 운동학적 관점에서 수행되어 왔다

변화의 추이, 정상보행군에 대한 평균과 표준편차로부터 정의된 정상영역 대비 차이 등을 분석한다. 보행분석은 재활의학과, 정형외과 등에서 주로 환자의 보

행이상 및 수술 및 치료 후 보행이상 특성의 효과를 정량적으로 측정하기 위한 방법으로 활용되고 있다. 최근에는 보행자가 밟고 지나가는 힘판으로부터 지면반력을 측정하거나, 근력모델을 이용하여 각 관절에 걸리는 토크와 힘을 유추하는 운동역학(kinematics)적 접근이 많이 이루어지고 있다. 또한 진단 및 치료목적 외에도



▲ 보행분석 실험장면(출처:physio.otago.ac.nz)



▲ 보행분석을 통한 관절운동 데이터

인체의 움직임을 역학적으로 연구하는 생체역학(biomechanics)분야에도 보행분석이 활발히 이루어지고 있고, 피험자 군에 따라 연령이나 질병 등에 의한 보행특성의 변화에 대한 연구결과가 다수 의학분야에 활용되어 왔다.

테드 맥기어의 수동적 보행기는 역학적 보행분석의 기초가 되었다

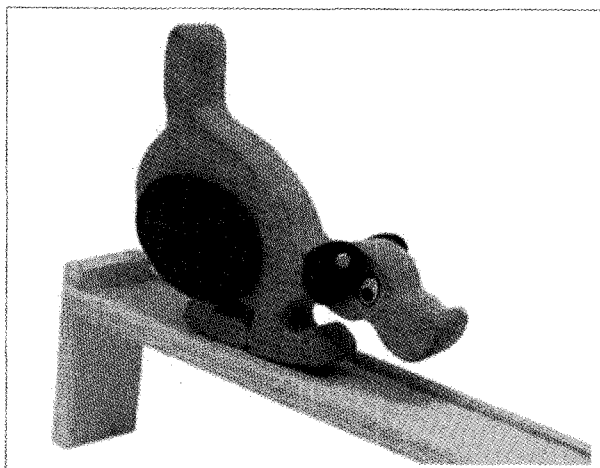
하게 해준다.

### 수동적 보행기

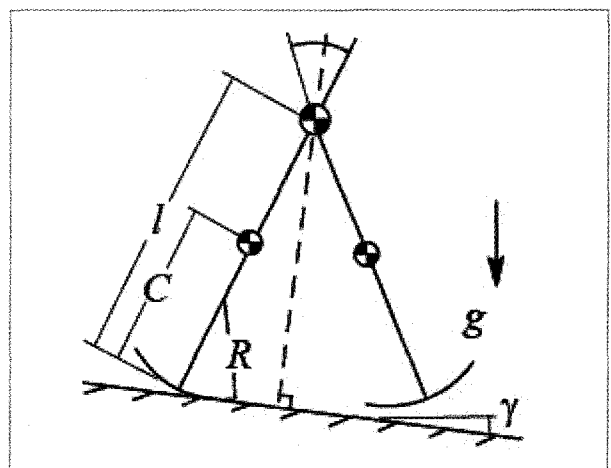
어린이들의 장난감 중에 모터나 제어기 없이 빗면을 걸어 내려오는, 혹은 무게추를 이용하여 걸음걸이를 구현하는 보행기(walker)를 본 적이 있을 것이다. 역학적 관점에서의 보행분석의 사례를 소개할 때 빼놓을 수 없는 것은 테드 맥기어가 1990년에 소개했던 수동적 보행기 모델로서, 간단한 역학 모델을 통해 안정성을 확보한 주기적 보행을 구현하였다. 구체적으로는, 인체의 질량을 무게중심이 고관절에 위치한 점질량으로, 다리는 질량이 없는 강체(剛體)로 가정하고 빗면을 내려오는 수동보행기(Passive walker)로 보행 모델을 수립하였다. 한발지지기 구간은 강체각(脚)을 중심으로 회전하는 역진자 운동으로 모델링 하였고, 양발지지기 구간은 두 강체각의 완전비탄성 순간충돌로 가정하여 운동량 보존법칙을 적용 한 후 운동방정식을 풀면, 적절한 초기조건에 대해 무한 걸음을 구현하는 보행기를 구현할 수 있다. 발을 내 디딜 때 강체각과 지면과의 충돌로 인해 에너지 손실이 발생하는데, 정상상태 보행을 구현하기 위해서는 주기적으로 손실된 에너지를 보상에 주어야 하며, 수동적 보행 모델에서는 일정한 기울기를 가진 빗면 위를 걸어내려 오므로써 중력에 의한 위치에너지가 충돌로 인해 손실되는 에너지를 보충해주는 역할을 하게 된다. 인체의 보행을 모사한다고 하기에는 너무나 간략화 된 수동적 보행 모델이 주목을

### 인체 보행의 개요

인체의 보행 내의 구간별 운동특성에 따라 보행 구간을 정의하는 방법은 다양하지만, 가장 많이 구분짓는 방법 중의 하나는 인체를 지지하는 다리의 지면 접촉여부에 따라, 한 다리로 지면을 지지하고 다른 다리는 공중에서 전진방향 운동을 하는 구간을 한발지지기로, 양다리로 지면을 지지하고 무게중심이 전진방향 뒤쪽의 다리에서 앞쪽다리로 이동시키는 시기를 양발지지기로 구분하는 방법이 있다. 이와 같은 보행 주기 구분은 각 구간에서 무게중심에 가해지는 지면반력의 작용점과 방향 등이 구별되기 때문에 운동역학적으로도 중요한 구분법이다. 보행분석에서는 각 구간에서 가해지는 지면반력의 크기, 각 관절의 운동 및 근육의 수축/이완에 의한 관절 모멘트가 구간별로 어떠한 분포를 가지며, 정상보행과 이상보행 피험자군 간에 어떠한 차이를 보이는지 등을 고찰한다. 이중 특히 지면반력으로 인한 무게중심의 운동을 고찰하는 운동역학적 보행분석은 인체의 보행의 원인과 결과에 대한 관계를 정량화함으로써 인체의 보행방식에 대한 물리적 해석을 가능



▲ 무동력 보행기 장난감(출처 toywizard.org)



▲ 빗면을 내려오는 수동적 보행기

받는 이유는, 간략한 보행 모델을 통해, 주기적 보행이 가진거나 제어 없이, 시스템 고유의 특성만으로 성립 가능하고, 심지어 전진 방향으로는 외란에도 시간이 지나면 정상상태 보행으로 수렴한다는 안정성까지 확보하고 있음을 보임으로써 복잡한 제어를 통해서 정상상태 보행을 구현한 기존의 접근방식에 대해, 새로운 관점의 보행분석의 초석을 제시하였기 때문이다. 다음 장에서는 테드 맥기어의 수동적 보행모델로부터 파생되어 인체 보행을 설명하게 된 후속 연구에 대해서 소개하기로 하겠다.

능동적 지면 밀기를 통해 평면상에서의 정상상태 보행을 구현하였다

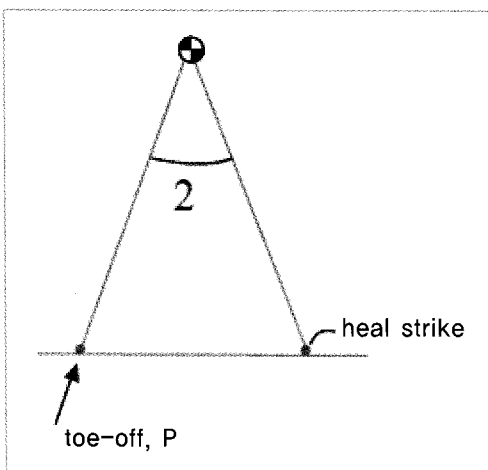
적 밀기보행 모델을 제안하였다. 평면상의 보행에 대해서 충돌에 의한 에너지 손실을 보상하는 방법으로는 일반적으로 한발지지기 구간 동안 지지다리를 중심으로

관절 토크를 발생시켜 가속시키는 방법과 양발지지 구간 동안 후면에 위치한 다리로 지면을 밀어줌으로써 수평방향 속도를 가속하는 방법이 있다. 후자의 경우 전진방향으로 앞서 진행하던 다리에 의한 지면 충돌에서 소모되는 에너지가 후방지지각의 지면 밀기 추진을 통해 보상된다. 이때 유입된 에너지 양과 손실된 에너지 양이 동일한 경우, 뒤따르는 한발지지기에서는 추가적인 에너지 유입은 필요하지 않다. 반면 능동적 밀기에 의한 에너지 증가량이 충돌에 의한 손실분보다 적을 때에는 이어지는 한발지지기에서 능동적 관절 토크 발생을 통한 추가적인 가속이 이루어져야 한다. 능동구동의 구현은 생리학적으로 근수축에 의한 대사에너지의 소모를 수반하므로, 유입되는 에너지의 총량을 최소화 하는 보행이 에너지 측면에서 최적화된 보행이라는 가정 하에, 보행에 유입되는 능동구동 에너지를 계산해보면, 한발지지기 구간 동안 능동구동을 하는 것보다, 양발지지기 구간 동안 능동적 밀기의 방법으로 구동을 하는 것이 약 2배 이상 에너지 효율이 높으며, 지면 충돌에 의한 손실분량 만큼만 충돌 직전에 보상해주는 것이 최소한의 에너지를 사용한 정상상태 보행을 구현하게 한다.

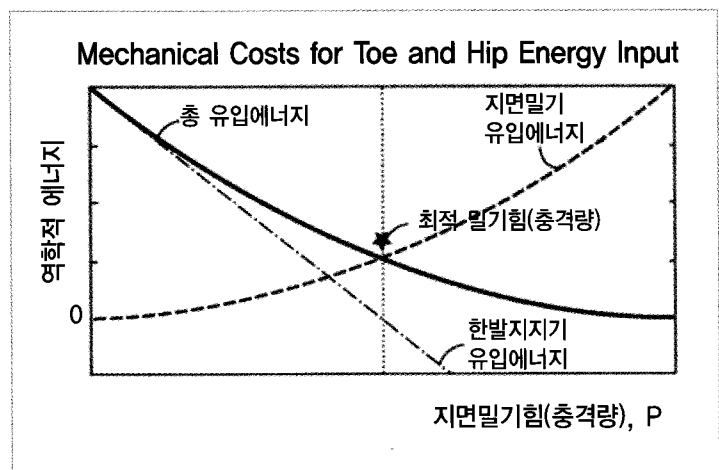
수많은 근육의 운동제어로 인해 이루어지는 인체의 보행을 지극히 간단한 역학모델로 해석한 결과가

### 능동구동 보행모델(Actively powered walking model)

앞서 소개했던 수동적 보행모델은 지면과 강체 다리와의 충돌 시 손실되는 에너지를 보상하기 위해 빗면을 내려오면서 감소하는 위치에너지를 활용한다. 이에 반해 평면 위에서의 정상상태 보행을 유지하기 위해서는 지속적인 에너지의 유입이 필요한데, 보행구간 중 어느 구간에 어떠한 방법으로 능동적 추진이 이루어지는가를 규명하는 것은 인체 보행의 에너지 관점에서의 이해를 높인다는 점에서 매우 중요하다. 특히 휴보, 아시모 등 인체의 보행을 모사한 휴머노이드 이족로봇에 비해 '진행거리당 유입된 역학적 에너지'로 정의되는 이동효율이 월등히 높은 인체의 보행특성을 이해하기 위해 아트 쿠오 및 앤디 루이나 등의 연구자들은 능동



▲ 능동적 지면 밀기 보행모델



▲ 지면밀기힘(충격량)의 크기에 대한 역학적 에너지 분포도

생리학적으로도 의미있는지를 고찰하기 위해 보행 시 소모되는 대사에너지를 산소소비량을 통해 측정한 연구가 맥스 도널린 등에 의해 발표되었는데, 놀랍게도 앞서 언급한 능동적 밀기 보행 모델로 예측한 바와 같이 주된 대사에너지 소모는 양발지지기 구간 동안 후방 지지각으로부터의 능동적 지면 밀기를 수행할 때 발생하였다. 또한 한발지지기 구간에서 비교적 소량의 대사에너지 소모가 관찰되었는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 양발지지기에서 에너지 유입과 손실간의 균형이 이루어졌음을 의미한다. 따라서 이 경우 한발지지기 구간의 보행 동특성을 역학적 에너지가 보존되는 역진자의 자유회전으로 모델링하는 것이 비교적 타당하다.

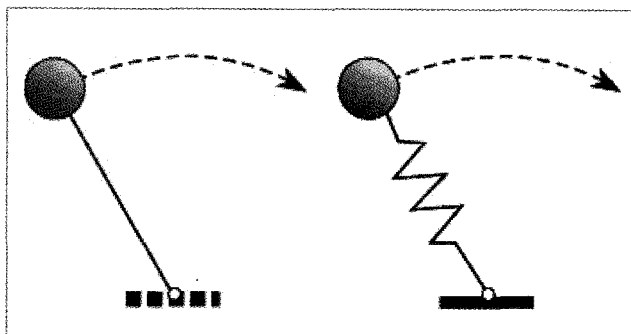
역학적 모델링을 통해 보행특성을 설명한 또 한 가지의 예로는 중력에 의한 충격량을 고려한 보행모델을 들 수 있다. 생체역학 분야에서뿐만 아니라 이족보행 로봇 등에서 사용되는 대부분의 보행모델에서는 양발지지기 구간에서의 다리와 지면과의 충돌이 매우 짧은 시간 동안 일어나는 순간충돌로 가정하는 해석방법을 활용하였다. 이러한 순간충돌 보행모델은 주기적 보행의 특성의 고찰이나 안정성 해석 등에 사용되어 왔으나, 실제 충돌구간에 발생하는 에너지 유입 및 손실을 정량적으로 해석하는 데에는 한계가 있다. 실제로 인체의 보행주기 중 양발지지기는 한 걸음 주기의 약 15~20%를 차지하며, 순간충돌의 경우 지면반력에 비해 크기가 매우 작다고 가정했던 중력의 영향을 무시할 수 없게 되어 유한시간 충돌 모델은 단순히 충돌시간의 증가뿐만 아니라, 중력에 의한 충격량을 고려하는 모델

**강체각으로 구성된 역진자 모델은 지면반력 데이터를 재현해낼 수 없다**

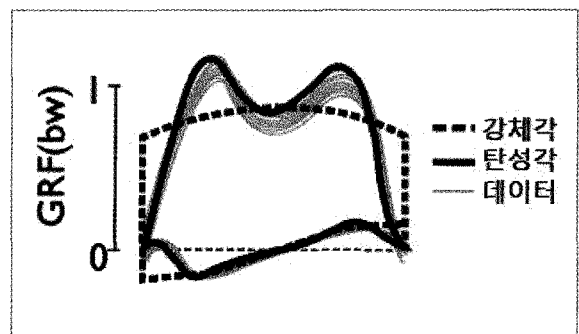
이 되어야 한다. 이렇게 수정/보완된 충돌 모델은 보행 시 충돌에 의한 에너지의 손실 및 유입, 충격량의 보행속도에 따른 변화 추이를 정성적으로뿐만 아니라, 정량적으로도 잘 예측할 수 있고, 이를 통해 청년군 대비, 노인군 혹은 환자군의 보행이상을 충돌 시 에너지 균형의 소실의 영향으로 정량화 할 수 있게 된다.

### 탄성각 보행모델

앞서 소개했던 수동적 보행모델은 점질량으로 가정한 무계중심이 질량이 없는 강체각에 연결된 일종의 역진자 모델이다. 이로부터 보행 고유의 주기성과, 안정성, 정상상태 보행유지를 위한 에너지 유입의 효율성 등을 설명 하였다. 최근 들어, 관절운동 측정에 기반한 기존의 보행분석이 힘판을 이용한 지면반력의 측정을 통한 운동역학으로 그 영역을 확장하면서, 보행 시 지면반력의 분포를 재생할 수 있는 보행모델에 대한 연구가 수행되었고, 기존의 강체각 대신 탄성을 가지며 길이방향의 변형이 가능한 탄성각(彈性脚) 보행모델(Compliant leg walking model)이 게이어에 의해 제안되었다. 한발지지기 구간에서 인체가 전진할 때 각 관절의 굽힘이 일시적으로 펴졌다가 다시 굽혀지는 구간이 존재하고, 이때 수직방향의 지면반력은 한발지지기의 중간에서 최소값을 갖는 엠(M)자형 커브를 가진다. 기존의 강체각 역진자 모델은 감속에서 가속구간의 수평방향 지면반력은 재현해 낼 수 있으나, 수직방향 반력은 재현해낼 수 없다는 점에서, 그 한계가 있었다. 반면 지지각의 굴신(屈伸)양에 비례하여, 탄성력



▲ 강체각 역진자모델과 지면반력 모사실험



▲ 탄성각 보행모델과 지면반력 모사실험

을 작용하고, 이에 대한 반작용으로 지면반력을 받는 탄성각 모델은 적절한 탄성각 계수를 선정하면 지면반력 및 보행운동 데이터를 잘 재현해 낼 수 있다. 또한 기존에 걷기와 달리기를 각각 강체각 및 탄성각 역진자 모델로 구분하여 설명하였던 접근방식에 비해, 탄성계수의 변화 성향으로 걷기로부터 달리기로의 변환과정을 설명함으로써 보행모델의 연속성을 확보했다는 점에서도 그 의의가 있다. 최근에는 보행 시 탄성각으로 모델링한 인체 다리의 관절 강성, 즉 탄성계수가, 보행 속도의 증가에 비례하여 증가하고, 이는 빠른 보행 시 필요한 추진에너지 증가를 유발함으로써, 에너지 효율적인 보행을 가능하게 한다는 연구결과가 발표 되었다. 이로부터, 청년군 대비 노인군의 보행특성 변화와 그 원인을 정량화할 수 있으며, 강성변화의 추세 및 차이는 나아가 에

너지 효율적인 보행 보조기 설계에 활용할 수 있다.

본문에서는 주로 관절각의 변화에 의존하여 오던 기존의 보행분석을 힘과 운동과의 관계를 통해 규명하는 기계공학적 보행분석의 사례에 대해 소개하였다. 복잡한 인체 보행의 기본적 특성이 간략화 된 역학적 모델로 설명가능하고 보행 메커니즘에 대한 이해를 넓혀 준다는 점에서 기계공학도로서 자부심을 느낀다. 역학적 보행분석 결과가 보행원리에 입각한 정량적 진단 및 재활 프로그램의 구현에 기여할 수 있다는 점에서 기계공학적 보행분석 연구는 더욱 활발히 지속되어 한다.

후기: 본문의 그림 작성을 도와주신 KAIST 기계공학과 생체모사 연구실 정한나 선생님께 감사드립니다.

### 기계용어해설

#### 포물선 안테나(Parabolic Antenna)

반사면이 회전포물선이나 2차 곡선으로 여진하는 1차 방사기의 다이폴이나 소형 전자 혼을 그 초점에 둔 구조의 마이크로파용 안테나.

#### 파커라이징(Parkerizing)

망간 및 철의 인산염을 함유한 약산성 인산 수용액을 끓여서 그 속에 철강을 담가 녹스는 것을 막는 방법.

#### 부분유입 터빈(Partial Admission Turbine)

충동 터빈에서 노즐 구경이 적당해지도록 노즐을 원주 일부에 배치하여 증기를 부분적으로 유입시키는 터빈.

#### 분압(分壓: Partial Pressure)

혼합기체를 만드는 각 성분기체가 단독으로 원래의 혼합 기체와 같은 체적과 같은 온도를 지니는 경우의 압력.

#### 분할 터빈(Partial Turbine)

반동 터빈의 날개차를 설계할 때 날개차 속에 유선을 가정하여 날개의 입구, 출구의 각도 및 층간의 형상을 결정할 수 있도록 하는 것.

#### 칸막이판(Partition Plate)

압력 복식 충동 터빈에서 단식 충동단락을 2조 이상 직렬로 배치할 때 각 단락의 압력이 다르기 때문에 단락 사이에 하는 칸막이.

#### 니들 주유기(Needle Lubricator)

축의 표면에 바늘 끝이 접하고 있어 축의 회전에 따라 움직일 때마다 좁은 틈새로부터 급유되는 장치의 주유기.

#### 니들 롤러 베어링(Needle Roller Bearing)

롤러 베어링에 직경이 5mm 이하이고, 길이가 직경의 3~10배 되는 가늘고 긴 롤러를 여러 개 꾸며 넣은 것.

#### 네매틱 액정(Nematic Liquid Crystals)

분자가 가늘고 길게 동일 방향으로 배열되어 있고 일정 온도 범위에서 액정의 성질을 나타내어 디스플레이에 쓰이는 것.

#### 정미효율(正味效率: Net Efficiency)

외부로부터 공급된 에너지 또는 동력에서 여러 가지 손실을 뺀 나머지 유효하게 이용된 동력과 공급 에너지 또는 동력과의 비율.

#### 네이벨 황동(Naval Brass)

구리 62%, 아연 37%, 주석 1%, 인장강도 35~45kgf/mm<sup>2</sup>, 연신율 50~30%이며 축, 기어, 볼트, 플랜지 등에 쓰이는 6-4 주석 함유 황동.