

생체역학에서의 보행분석

이 글에서는 보행분석의 역사와 분석 시스템을 간단히 조명해 보고, 보행분석이 임상생체역학과 신발 개발에 어떻게 적용되었는지 살펴보고자 한다.

김영관 경희대학교 기계공학과, 연구박사
김윤혁 경희대학교 기계공학과, 부교수

e-mail : ykkim01@khu.ac.kr
e-mail : yoonhkim@khu.ac.kr

보행(gait)이란 동물이 사지를 이용하여 몸을 움직이는 방식을 의미한다. 보행은 동물의 유전자 내에 탑재되어 개체발생적(ontogenic)으로 나타나는 것으로서, 신체를 움직이는 속도와 지면 접촉 형태에 따라 다양하게 구분된다. 인간의 경우 두 다리로만 보행하기 때문에 걷기(walking)와 달리기(running) 형태만 존재한다. 걷기는 지면과 두 다리가 모두 접지하는 두발 지지 국면(double support phase)이 존재하는 방식이고, 달리는 빠르게 무게 중심이 이동하기 때문에 두발 지지 국면이 없는 보행 방식이다. 한편 말, 고양이, 개처럼 네 발을 사용하는 동물들의 경우, 발구름 박자와 보행 속도에 따라 보행 방식이 걷기(walk), 종종걸음(trot), 구보(canter), 질주(gallop) 등으로 나뉜다.

보행분석의 역사

보행은 인류가 지구상에 존재하면서부터 있어 왔지만, 생체역학에서 체계적인 보행분석의 접근은 1880년대 유명한 사진작가인 마이브리지(Edward Muybridge)로부터 시작되었다고 볼 수 있다(그림 1). 그는 당시 획기적으로 고안된 사진기를 통해 인간의 다양한 움직임과 동물들의 질주하는 모습을 연속 사진으로 남겨 생체역학분야에서 영상분석의 아버지가 되었다.

운동학적 연구 이외에도 지면반력 측정이 1920년대부터 이루어지기 시작하면서 사진 분석에만 의존하던 초창기 보행분석은 1950년대 이후 역동역학 해석

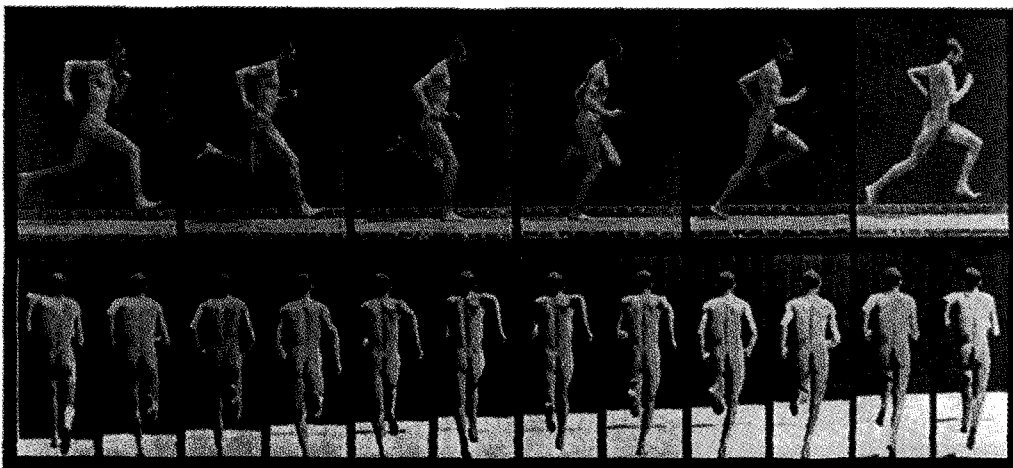


그림 1 마이브리지의 달리기 연속촬영 사진(1878년 작)

을 수행하여 관절모멘트 계산을 하게 되었다⁽¹⁾. 또한 근육활동을 규명하기 위한 근전도(EMG: Electromyography) 연구가 1940년대에서 1950년대 사이에 활발히 이루어지고, 최적화기법을 통한 근력 예측이⁽²⁾ 가능해지면서 비약적인 발전을 거듭하게 되었다. 수학과 공학 분야에서는 컴퓨터의 발전과 함께 근골격계 모델링 기술을 발전시켜 보행분석에 적용해 왔다.

보행분석 시스템 구성과 분석 변인들

많은 선행 연구들을 통해 보행분석에 적합한 전형적인 실험 시스템과 분석 방법이 수립되었다(그림 2). 동작분석 카메라는 몸의 주요 관절 주위에 부착된 반사마커의 3차원 좌표값을 측정하고, 분석 컴퓨터는 이런 좌표값들로부터 각 분절과 관절 운동을 기술하는 운동학변인들(관절각도, 각속도, 각가속도)을 계산한다. 카메라는 매우 좋은 시스템이지만, 고가 장비이고 마커 위치에 따라 측정을 할 수 없는 영역을 가지고 있

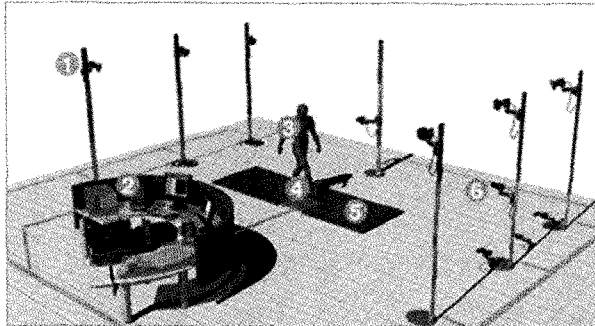


그림 2 일반적인 보행분석 시스템의 구성: ① 고성능 카메라, ② A/D변환기와 역동역학 프로그램이 포함된 분석 컴퓨터 시스템, ③ 피험자에 부착된 근전도 측정 장비, ④ 지면반력기, ⑤ 실험 조건에 따른 다양한 바닥 환경(탄성, 마찰력 변화된 바닥면), ⑥ 보조카메라

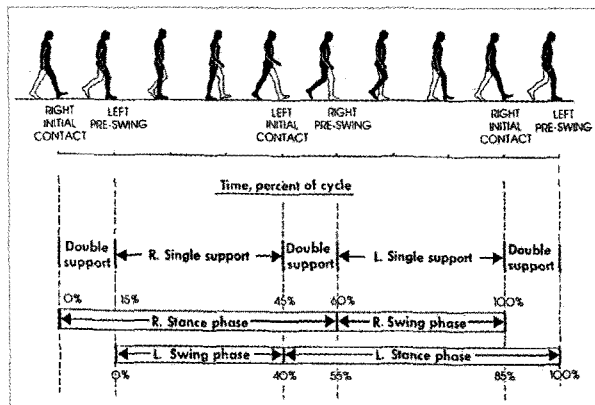


그림 3 정규화된 걷기 시간에 따른 국면 구분

기 때문에, 최근에 가속도계(accelerometer)나 전자기 센서(electromagnetic sensor)를 활용한 동작분석 장비가 보행분석에도 쓰이고 있다.

신체 주요 근육에 부착된 근전도 측정 전극(electrode)은 보행 시 발생하는 근활성도를 측정한다. 이 자료들은 근력 예측 결과의 신뢰도 분석, 동역학변인 결과의 타당성 분석에 활용되며 임상에서는 정상인과 비정상인의 보행 비교 근거 자료로도 쓰인다.

지면반력기는 발이 지면에 착지해 있는 동안 지면에서 인간에 작용하는 힘과 모멘트, 그리고 압력중심(center of pressure)을 측정한다. 이 지면반력 자료는 카메라를 통해 계산된 운동학변인들, 그리고 피험자의 신체정보(키와 몸무게)와 함께 역동역학 계산에 쓰인다. 역동역학 해석을 통해 움직임을 만들어내는 관절모멘트, 관절력, 관절과워가 도출되고, 근활성도 측정자료와 함께 보행분석 연구에 많이 활용된다. 요즘은 기술의 발달로 무선을 활용한 장비들(무선 근전도, 무선 가속도 측정기 등)이 점차 확대되고 있다.

이외에 보행분석 변수로는 보행 속도(gait speed), 보폭(step length), 보율(step rate)이 중요하게 여겨진다. 보행 속도는 보폭과 보율의 곱으로 정의되는데, 같은 보행 속도라도 환경조건(예: 미끄러운 바닥면)과 피험자 신체조건에 따라(예: 키 큰 피험자와 키 작은 피험자) 서로 다른 보폭과 보율의 조합이 나올 수 있다.

걷기 시 국면과 특징적인 관절 협응

걷기 동작의 국면은 입각기(stance phase)와 유각기(swing phase)로 나뉜다. 전체 사이클 시간을 100%로 정규화했을 때, 입각기는 60% 정도의 시간으로 발뒤꿈치가 닿은 시기(heel-strike, 0%)로부터 이지(toe-off)하는 순간까지이다. 반면 유각기는 발이 이지하여 또 다른 착지 전까지 하지가 움직인 국면으로 60%에서 100%의 정규시간 구간이다. 입각기가 시작된 직후 10~15%의 정규시간 사이에 반대발의 이지가 발생하고, 45~50%에서는 반대발의 착지가 다시 이루어지면서 대략 10~15%의 두발 지지 국면이 존재한다.(그림 3)

각 국면은 운동역학적으로 볼 때 서로 다른 근골격계 협응을 보여준다. 입각기에서는 발이 지면에 닿으면서 발생하는 충격량을 흡수하기 위해 인간은 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절을 거의 동시에 굽힌다(flexion). 굽힘 후 바로 관절들의 펴짐(extension)이 발생하면서 관절들은 관절모멘트를 만들어낸다. 운동역학이나 재활의학에서는 이런 형태의 근골격계 움직임을 폐쇄사슬형운동(closed kinetic chain motion)이라 정의하고⁽³⁾, 하지의 앞과 뒤에 위치한 이관절근육(bi-articular muscles)들의 협응을 강조하였다.

유각기에서는 엉덩관절을 중심으로 분절 회전이 일어나는데, 이 때 상위분절에서부터 하위분절로 이어지는 순차적 분절회전의 특징을 보여주고 있다. 발이 지면에서 닿고 있지 않기 때문에 운동역학에서 개방사슬형운동(open kinetic chain motion)이라 정의한다. 상위분절의 운동량이 관성모멘트가 작은 하위분절에 효과적으로 전이되기 때문에 하위분절의 선속도와 각속도가 상위분절보다 빠르다.

임상에 적용된 보행분석

신체 움직임이란 근신경역학 관점에서 볼 때 뇌에서 시작된 신경신호가 척수를 거쳐 근육에 전달되고,

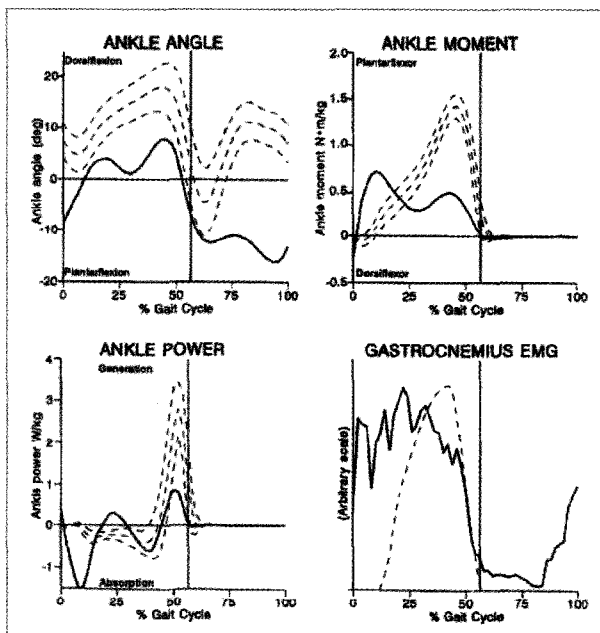


그림 4 6세 강직편마비 여아 환자와 정상아동의 발목관절 움직임 비교⁽⁴⁾

수축된 근육은 뼈를 움직여 관절 회전을 일으킨다. 일련의 과정을 거쳐 이루어지기 때문에 어느 한 곳에서도 이상이 발생하면 정상적인 신체 움직임은 나올 수 없다. 임상 보행연구는 병리학관점에서 피험자의 진단목적으로 많이 활용되어 정상인과 비교하는 연구가 주로 진행되어 왔다. 특히 뇌성마비(cerebral palsy), 파킨스병(Parkinsonism), 골관절염(osteoarthritis), 류머티스관절염(rheumatoid arthritis), 척수손상(spinal cord injury), 근위축병(muscular dystrophy), 인공하지(lower limb amputation), 인공관절(artificial joint), 다발성 경화증(multiple sclerosis) 환자들의 연구가 활발히 진행 되었다⁽⁴⁾.

수술이 필요한 장애인의 경우 보행분석을 통해 수술 전에 장애 원인이 되는 관절이나 근육들을 예측할 수 있고, 수술 후에는 수술 효과를 검증해 주는 도구로 활용되었다. 비수술적 치료 목적에서는 보행분석의 결과가 물리치료 처방과 보형물 착용 효과 등을 파악할 수 있는 자료로 활용되었다.

올바른 임상분석을 위해서는 앞서 언급한 운동학변인(각도), 동역학변인(관절모멘트, 관절파워), 근활성치 그래프들을 동시에 파악하는 것이 필요하다. 왜냐하면 관절각의 움직임은 자의적으로 발생할 수도 있지만, 수의적으로 발생할 수도 있다. 따라서, 관절모멘트와 관절파워 그래프를 통해 자의적인 제어에 의한 움직임인지, 수의적인 활동에 의한 움직임인지 파악하는 것이 중요하다. 또한, 운동학변인, 동역학변인 그래프들은 근활성치가 구심성수축(concentric contraction) 때문인지, 원심성수축(eccentric contraction) 때문인지를 파악하는 데 도움이 된다.

그림 4는 강직편마비(spastic hemiplegia) 환자의 경우 보행 시 발목에서 발생하는 변인들을 타나낸 것이다. 착지 후 입각기 1/3 정도 구간에서 정상인과 달리 발등굽힘(dorsiflexion)이 일어나지 않고, 발바닥굽힘(plantar flexion)이 있어났으며 이는 강한 발바닥굽힘 모멘트가 처음부터 발목에 작용한 것으로 볼 수 있다. 이에 따라 관절파워는 입각기 초반에 흡수역할을 수행했지만, 입각기 동안 충분한 발등굽힘이 이루어지지 않았기 때문에 발이 이지하지 직전 생성되어야 할 관절파워는 매우 부족하였다. 정상인에 비해 과도한 비

복근 활동이 이루어진 것으로 볼 수 있으며 이는 대부분 원심성 수축에 기인한 것으로 파악되었다. 따라서, 비복근의 경직이 적절치 못한 관절 협응을 유발하여 위와 같은 운동 결과가 나타났음을 알 수 있었다(4).

향후 보행연구는 보다 정확한 역동역학값과 근력값 계산에 필요한 순간회전중심(instantaneous center of rotation) 예측, 노약자나 환자의 보행을 도울 수 있는 외골격기계(exoskeletal machine)(예: 로보캡이나 아바타 영화에서 볼 수 있는 장비)의 영향성과 적합성 연구, 그리고 마커 없이 쉽게 환자에게 적용할 수 있는 계측장비 등의 연구가 공학과 함께 임상 분야에서 활성화 될 것으로 예상된다.

신발 개발에 적용된 보행분석

신발은 우리의 일상생활에서 불가분의 관계를 가지고 있다. 인간이 처음 신발을 사용하게 된 목적은 피부 보호와 발에 가해지는 충격력 완화일 것이다. 왜냐하면 맨발보행과 신발보행의 큰 차이점이 착지 시 지면반력값의 변화이기 때문이다. 맨발은 충격흡수를 바로 하는 반면, 신발은 중간 창(midsole)의 영향으로 지면반력을 더디게 신체에 전달한다. 반복적으로 가해지

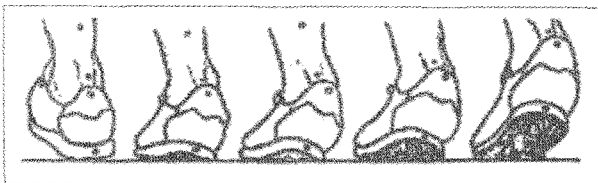


그림 5 왼발 착지 시 발생하는 회내 운동(7)

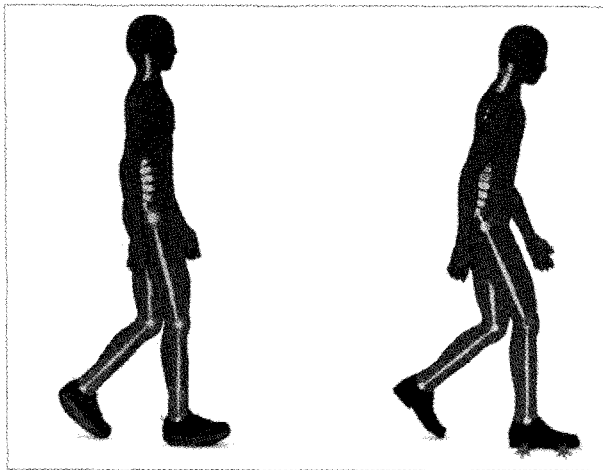


그림 6 마사이족 신발(좌)과 일반 신발(우) 보행 시 자세 비교(8)

는 수직 충격력이 보행 시 발생하는 상해 원인이라고 과거 여겨져 왔으나(5) 최근에 와서는 이러한 수직 충격력이 상해 원인이라고 결론을 내릴 수 없다는 주장도 야기되고 있다(6).

지면반력값 이외에 발목에서 일어나는 운동학 변인들의 변화도 역학적으로 매우 중요하다. 왜냐하면 인간의 몸은 여러 개의 분절들이 관절을 통해 연결되어 있어, 한 관절의 과도한 움직임은 다른 관절의 무리를 일으키기 때문이다. 발이 지면과 맞닿을 때 대부분 발 뒤꿈치 부분이 먼저 착지한다. 발목 관절의 해부학적인 특성상 착지 후 발등굽힘이 발생하면서 회내(pronation) 움직임도 같이 발생한다(그림 5). 그러나 회내 운동이 지나치게 크면 거골하관절(subtalar joint)에 무리가 가해지고, 이것을 보상하기 위해서 무릎관절에서 대퇴분절에 비해 하퇴분절의 비틀림 현상이 발생된다. 그 결과 일반적으로 관절염이 야기되기도 하고, 과도하게 달리기를 하는 경우 인자인대(ACL: Anterior Cruciate Ligament) 상해나 반월연골(meniscus) 상해가 뒤따를 수 있다(7). 따라서, 신발에서는 다양한 중간 창 재질, 굽높이 변화 등을 통해 발목관절의 안정성을 증가시키는 방법들이 시도되었다. 정형외과의 오소틱(orthotics)도 같은 맥락의 적용으로 볼 수 있다.

최근 보행과 관련된 신발의 이슈는 다양한 기능성 신발들의 효과와 신뢰성에 있다. 예를 들면, 바닥면이 등근 활처럼 생긴 기능화(마사이족 신발)의 경우 발 뒤꿈치 착지보다 맨발보행처럼 발바닥 착지를 유발하여 관절에 무리를 없게 해 주며, 착지 시 무게 중심이 기저면(base of support)에 더 가까이 가기 때문에 척추를 비롯한 골격계가 가지런해지는 효과도 있다고 주장한다(그림 6)(8). 하지만, 이 기능성 신발의 경우 굽높이가 높기 때문에 관상면(frontal plane)에서의 발목 안정성(stability)에는 부정적으로 작용할 것으로 보인다. 최근 들어 신발보행 때문에 얻게 되는 부정적인 효과(예, 관절염)가 연구를 통해 부각되기 때문에 향후 보행과 관련된 신발연구는 맨발보행 효과에 더 가까이 갈 수 있는 신발개발에 초점이 맞춰질 것으로 생각된다.

맺음말

이 글을 통해서 지금까지 보행분석 역사, 분석 시스템, 적용된 임상연구와 신발연구에 대해 간략히 다루어 보았다. 앞서 언급한 대로 보행이란 인간의 원초적인 행동으로 모든 사람에게 적용되고, 인류가 존재할 때까지 계속해서 연구되어야 할 주제이다. 따라서, 더욱 효과적인 보행연구를 위해 기계공학도에게 동역학적 모델링과 근력 예측 알고리즘의 심화시키는 것도 중요하지만, 인간이 가지고 있는 근신경역학을 좀 더 깊이 이해시키는 것이 필요할 것 같다. 이제 학문의 고유 영역 주장이 점점 약해지고 융합연구가 활발히 이루어지고 있기 때문에, 기계공학도이지만 타학문의 이해가 요구되기 때문이다. 마찬가지로 보행연구도 생체역학이란 주제 아래 의학, 체육학, 공학의 융합연구가 더 활발해질 것으로 생각한다.

참고문헌

- (1) B. Bresler and J. P. Frankel, The forces and moments in the leg during level walking, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 72 (1950) 27-36.
- (2) D. E. Hardt, Determining muscle forces in the leg during normal human walking - An application and evaluation of optimization methods, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 100 (1978) 72-78.
- (3) E. Kreighbaum and K. M. Barthels, Biomechanics: A qualitative approach for studying human movement, Burgess, (1981), 377-413.
- (4) M. W. Whittle, Clinical gait analysis: A review, Human Movement Science 15 (1996), 369-387.
- (5) S. James, B. Bates and L. Osterning, Injuries in runners, Injuries in runners, American Journal of Sports Medicine 6 (1978), 40-50.
- (6) B. M. Nigg and J. M. Wakeling, Impact forces and muscle tuning: A new paradigm, Exercise and Sport Sciences Review 29 (2001), 37-41.
- (7) 문영진, 고기능 스포츠 신발 개발을 위한 운동역학적 연구방법과 경향, 스포츠과학, 체육과학연구원 (2005), 25-30.
- (8) kr.mbt.com

기계용어해설

S형 꼬임 로프(Left-lay Rope)

몇 개의 철사를 꼬아서 한 줄의 새끼줄을 만들고, 다시 6가닥의 새끼줄을 꼬아서 1줄의 마 로프를 중심으로 꼬아서 만든 줄.

레벨(Level Vial; 水準器)

유리관 속에 알코올 또는 에테르 등을 넣고 약간의 기포를 남겨 놓아 기포의 위치로 수평을 재는 기계.

침수건조(浸水乾燥: Water Seasoning)

일정 염분을 함유한 물 속에 목재를 담가 두어 목재 속의 수액과 외부의 수분을 바꾸어 이후의 건조를 쉽게 하는 것.

연수장치(軟水裝置: Water Softening Plant)

넓은 의미로는 수중의 용해물질들을 제거하는 장치이며, 일반적으로는 수중에 용해한 칼슘염, 마그네슘염을 침전시켜 제거하는 장치.

양수장치(揚水裝置: Water Supply System)

여객차의 화장실, 세면장 등에 공급하는 물을 바닥 밑 탱크로부터 압력공기로 양수하는 장치.

수관 보일러(Water Tube Boiler)

다수의 작은 지름으로 된 수관을 보일러의 증발 전열면에 형성하고, 관 속의 물을 관 밖에서 가열하는 방식의 보일러.