

# 100km 행군을 즐겁게 하기 위한 보행보조용 외골격기구의 개발

영화 로보캅, 아이언맨 등에 등장하는 외골격기구(exoskeleton)는 이제 더 이상 먼 미래의 얘기도 아니고 딴 나라 얘기도 아니다. 외골격기구 중 특히 하지외골격기구는 Baytheon Sarcos, Berkley Bionics, Exohiker, Bleex, HAL5 등의 이름으로 버클리, 스탠퍼드 등 해외 우수 연구집단에서 이미 개발을 성공하였고 상용화를 앞두고 있다. 늦은 감은 있지만 국내에서도 재활의료용, 군수용 하지외골격기구 연구가 진행되고 있다. 본 저자는 최근 기존연구와 다른 접근방식으로 고민을 시작하였고 본 연구팀이 상표출원한 PLE™, LeSATA™의 개발을 서두르고 있다. 이 글을 통해 그간의 고민들을 간략히 털어놓을까 한다.

김철웅 (주)트리플씨메디칼, 대표이사

e-mail : woong25@korea.ac.kr

## 장거리 보행보조용 외골격기구를 개발하기 위한 마음자세

본 저자는 2007년 가을, 절친한 의대교수들과 의기투합하여 정형외과 수술기구 및 재활보조기구를 개발하는 벤처기업을 창업한 바 있다. 이후 3년간 기업을 유지하며 100% 수입에 의존하는 정형외과분야 의료

기기의 국산화라는 근사한 창업목표의 실현을 위해 버라이어티한 경험들을 쌓을 수 있었고, 그 내공의 시간들을 통해 과연 '서바이벌'이란 무엇인가?에 대한 신랄한 자기비판과 자기검열, 성찰의 시간들을 나뉠 견딜만한 고통이라 위로하며 즐길 수 있었다. 이와 같은 전투적인 용어의 난재 속에서 최근 3년간 다양한 경험철학과 노하우를 터득하게 되었다. 이제는 어느덧 창업 4년

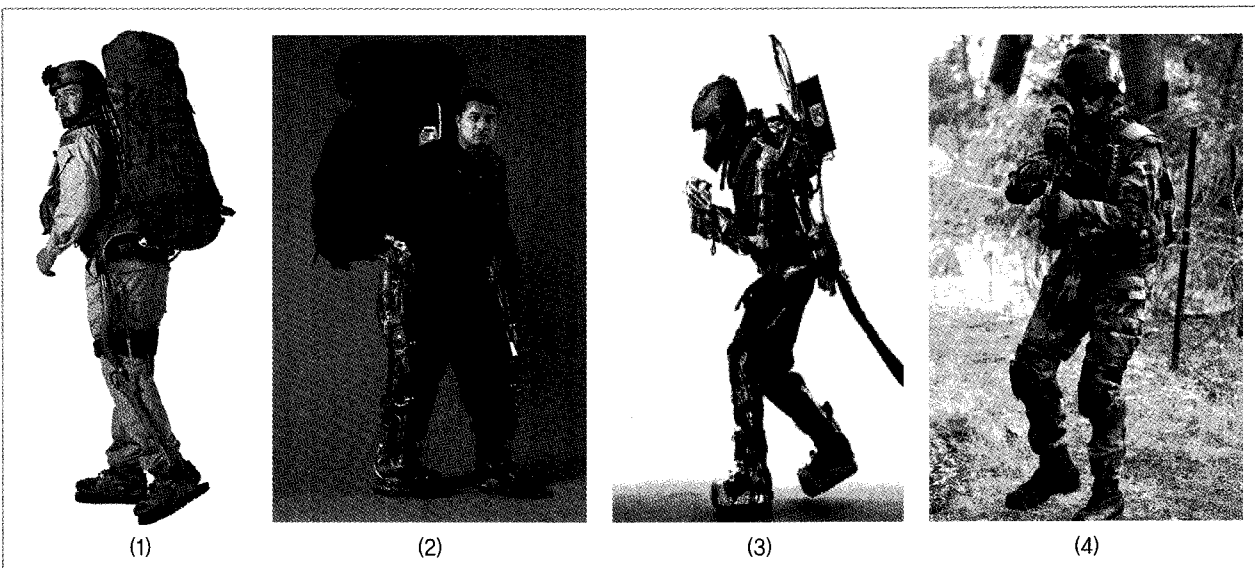


그림 1 최근 전 세계적으로 개발진행 중인 보행보조용 외골격기구들 (1) Berkeley Bionics™, (2) Bleex(미군의 Future Force Warrior 프로젝트), (3) Sarcos, (4) Land Warrior

차를 달리며 중견기업을 꿈꾸는 시점에서 왜 이견희 회장께서는 '선택과 집중'을 선택하셨고, 안철수 석좌교수께서는 기업가의 도전정신을 제1의 멈추지 않는 성장 동력의 모태라 하셨는지 조금은 이해할 것 같다. 서두가 지나치게 근엄하고 장황했던 것 같다. 최근 본 저자는 신개념 보행보조용 외골격기구의 제품화에 관심이 부쩍 많아졌다. 그림 1과 같이 이미 전 세계적으로 다양한 보행보조용 또는 적하분산용 외골격기구의 개발이 완성화 단계에 있다. 오늘은 지난 번 테마기획(기계저널 2010년 2월호)의 논제였던 '슬관절의 바이오공학적 접근'에 언급했던 연구배경을 바탕으로 현재 본 저자가 개발하고 있는 보행보조용 외골격기구에 대해 간단히 소개하고자 한다.

### 보행이란 무엇이며 보행을 돕기 위해 무엇을 개발해야 하는가?

우선 우리가 매일 아무 생각없이 행하는 보행(gait)이란 무엇일까에 대한 우문(愚問)을 던져보자. 보행을 굳이 정의하자면 '입각기(stance phase) 안정성을 유지하면서 신체를 앞으로 이동시키는 하지의 반복 진행'(J. Perry, 1992)이라고 할 수 있다. 따라서 '보행보조기구'를 떠올리면 정상보행을 실현하지 못하는 비정상적인 소외층, 즉 사고의 아픔으로 amputee gait를 구사하는 하지절단환자이거나 십자인대 파열, 골관절염 등을 겪은 비정상적 슬관절 보유자이거나 고관절 족관절 등의 상해자이거나 고령화 노령화 사회에서의 우리부모세대 등을 떠올릴 것이다. 그러나 본 저자가 개발하고자 하는 제품의 컨셉트는 다르다. 정상인 또는 특수목적의 보행숙련자가 더 즐겁고 편하게 임무를 수행하기 위한 이동수단을 개발하는 것이 소박한 연구목표이다. 목표가 조금은 막연하기에 세부실천적 미션을 제시하자면, 100km의 행군을 시작단계부터 끝까지 표정변화없이 미소 지으며 수행하게 해주는 그런 보행용 외골격기구를 개발하는 것이다. 이러한 소박한 듯 어마어마한 미션을 달성하기 위해서는 세부적인 시나리오와 의학적 견지에서 학술적 백그라운드의 조율이 무엇보다 중요하다.

새롭게 개발할 보행보조용 외골격기구의 컨셉

트를 현실화하기 위해서는 자신의 아이디어를 만화책 콘티처럼 만들어 볼 필요가 있다. 자! 이제부터 자신이 100km 행군을 하고 있다고 상상을 해보자. 본 저자는 1990년대 초반에 군대에서 80km 행군을 경험해 보았기에 그 참기 힘든 고통이 구체적으로 무엇이며, 곁으면서 잠을 자고 꿈도 꾸다던 선배들의 허풍이 거짓이 아니었음을 익히 실감한 바 있다.

100km 행군과 같은 극한의 조건에서 발바닥의 물질 등 실제로 대부분의 고통을 안겨주는 외적 요인(피부손상, 근육피로, 피로누적으로 인한 신경체계교란 등)과 정신적 요인(개인적인 차가 큰 멘탈릭 페인, 인내력 등)에 대해서는 논외로 하고, 순수 kinematics적인 관점의 고관절, 슬관절, 족관절의 상호운동과 관련된 장거리 보행에 대해서만 논의하기로 하겠다. 우선 아래와 같은 질문을 스스로에게 던져본다.

- 1) 장거리 보행은 하지의 어떤 메커니즘 때문에 가장 힘든 것일까?
- 2) 보행을 위해 방출되는 에너지의 소비는 대부분 어떤 메커니즘에서 발생하는 것일까?
- 3) 의미없이 소비되는 에너지를 동력원으로 재환원시키는 메커니즘을 개발할 수는 없는 것일까?

상기 질문에서 반복되는 공통점은 그 어떤 메커니즘의 실체를 밝히는 것이고, 그 해답은 정상적 인체 보행에서 숨은그림찾기를 시도하는 것이다.

### 개발하는 보행보조용 외골격기구에 어떤 개념을 도입할까?

기존의 보행분석 연구에서는 하지를 하나의 스프링으로 간주하여 평가하였고, 보행에서 에너지원은 toe-off impulse와 hip torque로 이루어지고, hip torque를 줄이는 것이 가장 효율적인 보행이라는 것이 통설이다. 따라서 hip torque를 능동적으로 컨트롤하기 힘든 조건이라면, 반대개념으로 toe-off impulse를 증가시켜주거나 heel-strike 때 발생하는 충격에너지를 조심스레 잘 저장했다가 적절한 타이밍에 유효한 에너지로 발산해주는 방법을 택하면 효과적인 보행보조가 가능할 것이다. 따라서 초기접지기(initial

contact) 시 충격흡수를 통해 저장된 에너지가 입각기 말기(terminal stance)의 toe-off 시 입각하지(stance limb)를 통해 슬관절의 신속한 신전을 도와준다면 하지강성(leg stiffness)을 효과적으로 증가시킬 것이고 그로 인해 무의미하게 발산되는 에너지를 효과적으로 저장·방출하는 메커니즘 개발이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 슬관절의 급속한 신전을 보조하기 위해 족관절 액추에이터에서 저장된 에너지가 슬관절 부까지 최소한의 손실로 전달되는 1차 2차 액추에이팅 메커니즘을 설계 제작한다면 보행에 필요한 elastic strain energy를 혁명적으로 저장, 발산할 수 있고, 그 결과 장거리를 매우 즐겁고 편안하게 보행할 수 있을 것이다. 여기서 가장 중요한 1차 목표는 인간 보행 시 발생하는 kinetic energy 및 인체에 의한 위치에너지(potential energy)의 일부는 collision phase에서 일시적으로 탄성 변형을 에너지로 저장되었다가 elastic recoil에 의한 rebound phase에서 방출될 수 있으므로 이때 발생하는 소중한 에너지들을 인체에서는 피로라는 이름하에 방출하며 고통받을 것이 아니라, 족관절에 이 에너지를 효율적으로 저장·방출하게 해주는 기술일 것이다. 또한 이 족관절 액추에이팅 메커니즘은 슬관절 액추에이터에 의한 과도한 인공하지강성을 능동적이고 적절한 수준으로 보상해 주는 능력까지 보유하게 될 것으로 생각된다.

### 무의미하게 방출되는 에너지를 효과적으로 저장하는 방법은 무얼까?

기존의 연구에서는 하지를 하나의 세그먼트로 정의하였으나 본 연구팀에서는 좀 더 현실적으로 대퇴부와 경골부, 즉 two segment의 상대적 각속도로 컨트롤하여 하지강성과 보행속도를 증가시킨다는 개념으로 knee-ankle two actuator system을 개발하였다. 그림 2는 상기 메커니즘으로 본 연구팀이 최근 개발한 보행보조용 하지외골격기구이다. 예쁜 프랑스 여성이름처럼 일명 ‘르사타’(Leg Stiffness controllable Artificial Tendon Actuator, LeSATA™)라 명명하였고 이미 상표출원하였다. 현재 4개의 관련 특허가 출원 중에 있다.

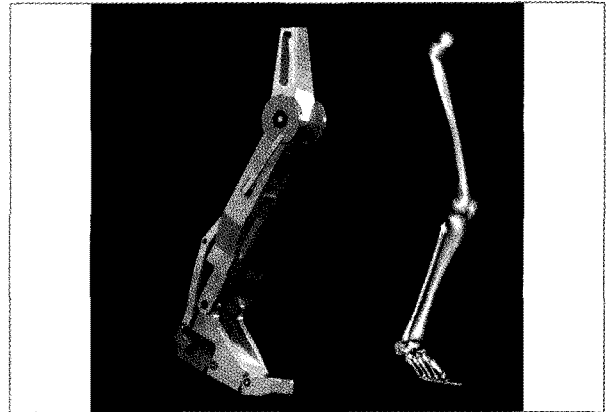


그림 2 본 연구팀이 개발 중인 보행보조용 외골격기구(Leg Stiffness controllable Artificial Tendon Actuator (LeSATA™, 일명 르사타))

그러나 완벽해 보이는 듯한 상기 메커니즘도 인위적 슬관절 액추에이팅에 의해 분명히 족관절부에서는 보상을 요구하는 새로운 보상기전(compensatory mechanism)이 발생할 것으로 예상된다. 즉, 과도한 인위적 슬관절 액추에이팅은 하지강성을 지나치게 증가시켜 족부디딤(foot touch-down) 시에 동반되는 비정상적 collision phase에 의해 발헛디딤 보행(stumbling gait)이 발생할 것이라는 게 본 저자의 강한 추측이다. Andre Seyfarth(2005)는 입각기 중에 하지강성은 놀라울 정도로 일정하고 유각기 동안 수평속도는 일정하게 유지되는 반면, 수직속도는 정점(apex)에서 0이 된다고 보고하였다. 따라서, 하지강성 증가를 위해 thigh와 shank로 구성된 two segment의 상대적 각속도는 상기 A. Seyfarth의 조건에 충족시키되, 전단계 보행의 유각기에서 가속도 증가가 반복되므로 나타날 수 있는 시간경과에 따른 보행속도 증가와 그로 인한 발헛디딤을 미리 예측하고 설계에 반영해야 할 것이다. 또한 시간경과에 의한 보행속도 증가를 방지하기 위해, 인위적 감속 통제로 인해 불필요한 kinematic energy의 방출이 발생된다면, 오히려 액추에이터의 실효성을 의심케 할 수 있다고 판단된다. 결국 유각기에서의 반복적으로 하지강성 액추에이팅이 지속된다면 정상보행 영역을 벗어나게 될 것으로 예측된다. 따라서, 슬관절 액추에이팅에 대한 보상기전이 족관절 상에 존재해야만 하며, 중족지절관절 경사각(metatarsophalangeal joint tilt (MTPJ) angle) 및 보행속도 변화가 슬관절 보상기전에 어떠한 상호영향

을 미치거나 확인하여 역으로 검토해 가면 그 해결책을 찾을 수 있을 것이라 확신한다.

### LeSATA의 슬-족관절 에너지 저장 방출 작동 원리

LeSATA™는 족관절 및 슬관절의 보상보행거동을 만족시키기 위해 기본적으로 knee-ankle joint에 각각의 독립된 액추에이터가 탑재된 구조이다. 그림 3과 함께 구동원리를 간단히 살펴보면, 그림 3에서 부하반응기(loading response)시에 1) heel strike와 동시에 heel(①)의 가압이 이루어진다. 2) 가압된 heel(①)에 의해 링크1(②)과 링크2(③)는 각각 정해진 범위 내에서 작동한다. 3) 링크2(③)에 의해 피스톤1(④)은 전진 이동하며 코일 압축스프링1(⑤)을 가압하고 동시에 heel strike 시에 충격완화 역할을 한다. 4) 전진이동한 피스톤1(④)은 하단에 존재하는 언더컷(⑦)이 잠금부(⑥)에 의해 후퇴가 불가하며 코일압축스프링

(⑤)의 탄성 에너지를 저장한다. 한편 5) 가압된 heel(①)에 의해 그림 4의 링크3(⑧)과 링크4(⑨) 또한 각각 정해진 범위 내에서 작동한다. 6) 링크4(⑨)에 의해 피스톤2(⑩)는 상승 이동하며 코일 압축스프링2(⑫)를 가압한다(동시에 heel strike 시 충격흡수). 7) 상승이동한 피스톤2(⑩)에 의해 가압된 코일 압축스프링2(⑫)의 덮개(⑬)하단부는 잠금부(⑬)에 의해 하강이 불가하며 코일 압축스프링2(⑫)의 탄성 에너지를 저장한다. 또한, 그림 5에서 8) 말기입각기(terminal stance) toe-off 시에 Toe(⑭)는 작동 스위치(⑮)를 가압하게 되고 타단은 잠금고리(⑥)를 가압한다. 9) 피스톤1의 언더컷(⑦)(그림 3 참조)은 잠금고리(⑥)에서 벗어나 코일 압축스프링1(⑤)의 저장된 탄성 에너지를 방출하게 된다. 10) 코일 압축스프링1(⑤)에 의해 피스톤1(④)은 후퇴하며 링크1(②)과 링크2(③)에 의해 heel(①)은 원상복귀한다. 11) heel(①)의 원상복귀는 Toe-off 시 강한 탄성에너지를 방출해준다. 마지막으로 그림 6의 유각기(swing phase) 시에 12) 링크5(⑯)는 대퇴부(⑰)와

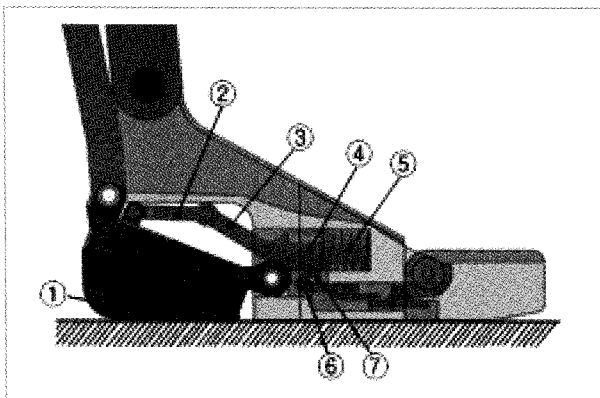


그림 3 족부지절관절(MTPJ)부의 부하반응기 기전

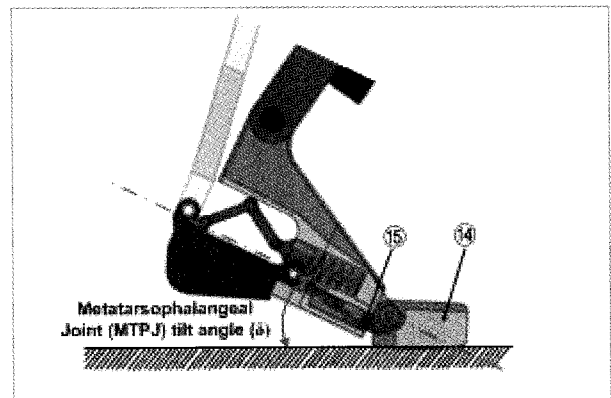


그림 5 족부지절관절(MTPJ)부의 말기입각기 기전

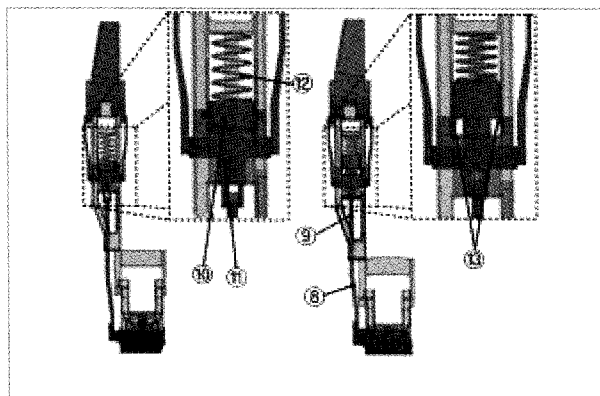


그림 4 슬관절부의 부하반응기 기전

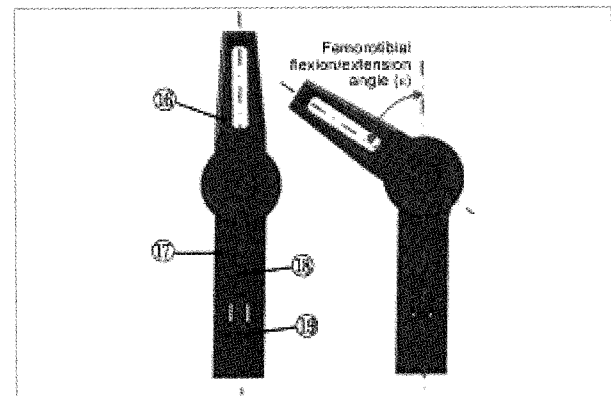


그림 6 슬관절부의 말기입각기-유각기 기전

연결되어 대퇴부(16)의 굴곡 시 기설정된 범위 내에서 동작한다. 13) 링크5(18)의 타단은 슬라이드 부재(19)와 연결되어 경골부(17) 측면에 형성되어 있는 가이드홈과 맞물려 수직 이동된다. 14) 코일압축스프링2(12)(그림 4 참조)는 잠금부(13)에 의해 하강이 불가하여 대퇴부(16)의 굴곡에 영향을 주지 않는다. 15) 굴곡된 대퇴부(16)에 의해 슬라이드 부재(19)는 상승하며 잠금부(13)를 가압하게 된다. 16) 가압된 잠금부(13)는 코일압축스프링2(12)에 저장된 탄성에너지를 방출케 하며 대퇴부(16)의 신전 시 하지강성(leg stiffness)를 증가시킨다.

### 액추에이팅으로 인한 보상기전과 중족지 절관절(MTPJ) 경사각은 어떤 관계성을 갖을까?

앞 절에서 언급한 내용과 같이 중족지절관절 경사각(MTPJ)의 변화와 보행속도가 무리한 액추에이팅으로 인한 보상기전에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 파악해 볼 필요가 있다. 이족보행운동에 의해 발생하는 인체상부의 위치에너지 일부는 heel strike의 collision phase에서 일시적으로 탄성변형에너지로 저장되고 반등구간에서 탄성반동에 의하여 방출된다(A.D. Kuo, 2005). 하지강성은 stride frequency와

지면접촉시간과 같은 많은 운동역학적 변수에 영향을 미친다고 알려져 왔다(C.T. Farley, 1996). 따라서 액추에이터의 역할을 하는 하지의 건(tendon)들은 근육-건 단위의 컴플라이언스에 관계되고 하지강성에도 영향을 미친다(R.M. Alexander, 1988). 본 연구팀이 개발 중인 LeSATA™는 족관절과 슬관절에 두 개의 연속스프링으로 된 active coil을 변화시키는 개념을 도입하였다. LeSATA™에 적용된 액추에이팅 기본개념은 한 방향 압축건이 적용되며, 두 개의 헬리컬 압축스프링의 이상적 조화에 의해 작동한다. 두 개의 스프링을 연결하는 강제커플러는 커플러 반시계 방향으로의 회전은 낮은 강성을 가진 스프링2의 active coil의 개수를 증가시키고 높은 강성을 가진 스프링1의 active coil의 개수는 감소시킨다.

이상의 기전에는 중기입각기부터 초기유각기에 걸쳐 보행속도와 지면반발력에 크게 영향을 미치는 중족지절관절의 경사각 변화가 매우 중요하게 작용한다. 따라서 그림 7의 좌측그림과 같이 Helen hayes marker set을 착용한 피험자로부터 우측과 같은 중요한 그래프를 얻을 수가 있다. 그림 7 및 그림 8과 같이 중족지절관절의 변화 및 보행속도에 따른 고관절, 슬관절, 족관절의 상호운동 관계를 평가한 그래프는 보행보조용 외골격기구를 개발하는데 있어서 매우 중요한 기초자료로 활용된다. 정상인이 특수조건 하에서의 보행

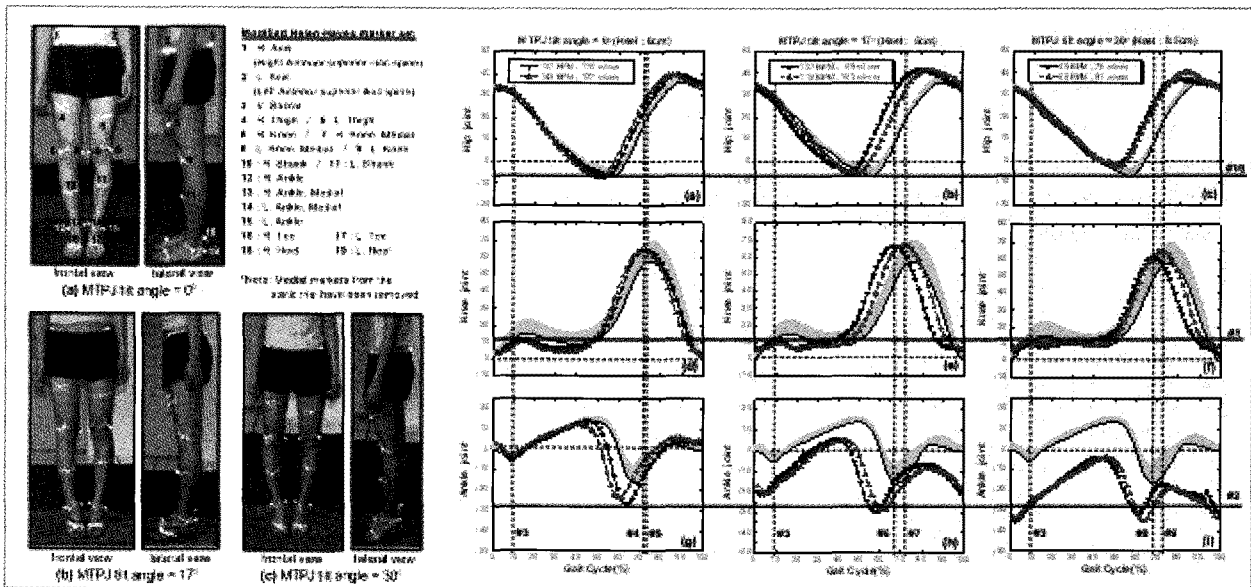


그림 7 중족지절관절(MTPJ) 경사각의 변화가 hip-knee-ankle joint의 flexion-extension에 미치는 영향을 연구하기 위한 Helen hayes marker set(좌측), 그리고 실험결과 그래프(우측)

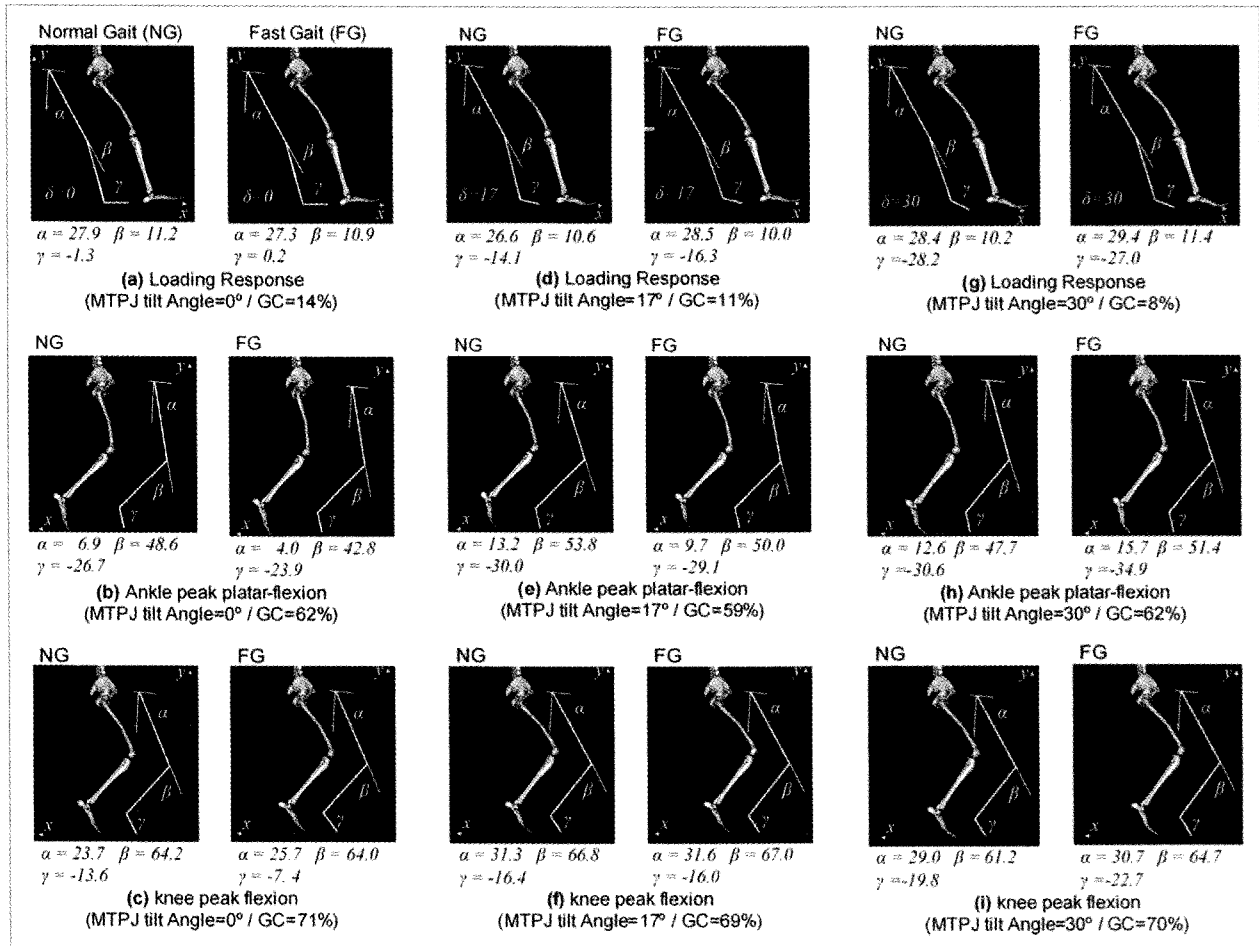


그림 8 보행분석결과를 이용하여 중족지절관절변화에 따른 hip-knee-ankle 간의 상호각을 구한 사례

을 수행한 임상적 실험 결과없이 단순히 기계공학적인 설계 마인드로 외골격기구를 개발한다는 것은 있을 수 없는 일이다. 지면 제약상 그림 7, 그림 8에 대한 결과 그래프 분석은 생략하기로 한다.

### 맺 음 말

보행보조용 외골격기구의 개발에 대해 거창하게

시작된 본 원고가 한정된 지면의 제약으로 인해 진짜 재미있는 얘기들을 충분히 하지 못하고 여기서 막을 내린다. 그러나 녹색성장, 그린에너지, 저탄소 등이 최고의 화두가 된 이 시대에 건강과 환경문제를 동시에 해결해 주고 미래의 여가와 이동수단을 더욱 즐겁게 해줄 수 있는 차세대 보행보조수단이 이런 작은 고민의 시작에서 소박하게 비롯될 수 있다는 하나의 사례를 기계공학을 전공하는 후배들에게 전하고 싶다. 감사합니다.

### 기계용어해설

#### 유효흡입수두(有效吸入水頭: Net Positive Suction Head)

NPSH로 약기. 펌프의 캐비테이션을 검토할 때 쓰이는 수치로, 1단짜의 날개차 입구직전의 액체의 압력과 그 온도에서 액체의 포화증기압력과의 차이.

#### 망상조직(網狀組織: Network Structure)

고용체가 분열하여 2가지 성분으로 나누어지는 경우, A성분에서 B성분이 석출될 때 A성분의 결정입계에서 석출되는 망상의 된 조직.