

에너지 저장형 인공발의 개발

김규석*, 류제청, 김선정, 문무성
재활공학 연구센터

Development of the Energy Storing Foot

G.S.Kim, J.C.Ryu, M.S.Mun, S.J.Kim
Korea Orthopedics & Rehabilitation Engineering Research Center(KOREC)

Abstract

KESF-1 foot conceptually provides storage of potential energy and is converted to kinetic energy throughout the weight - bearing phase of the gait cycle. This stored energy is progressively released as the foot continues through the toe-off phase to rebound and propel the body forward. A weight deflects the keel through a predetermined range, then the keel "springs back" as weight is removed. Foot designs criteria were selected to guide development beyond the proof-of concept composite material keels; 1) store and return energy (1-3/4 " metatarsal deflection at 435 pounds vertical load), 2) natural feel and stability; 3) useful life of 3-years; 4) lightweight; 5) reduced production costs.

The purpose of this study is developed the comfortable stable foot that fitted with Korean lifestyle and road condition. The results produced the realistic cosmetic foot cover with polyurethane form and the keel composed with composite materials of both glass fiber and carbon fiber.

서론

신체적으로 장애를 가지고 있는 개개인을 위해 기본적인 인간적 삶을 영위할 수 있도록 운동기능을 회복시키거나 잘못된 보행습관 및 퇴화된 기능을 향상시켜줘야 한다. 특히 대퇴나 하퇴절단자들은 아무 불편없이 양발로 서서 장애물이 없는 노면을 안전하게 걸을 수 있어야 한다. 이런 욕구를 충족시키기 위하여 선진 외국에서는 그동안 인공발에 대한 많은 연구 발전이 있어왔다. 특히 기존의 인공발은 보행의 안전성 및 안정감에 중요한 요소로서 단축식 인공발 및 SACH식, 다축식 인공발등이 개발되었고, 최근에는 자연스러운 보행 및 동적인 운동이 왕성한 사람을 위한 복합소재를 이용한 Multi-flex 인공발과 탄성재의 특성을 이용한 에너지 저장형 인공발등이 개발되어 상품화되고 있다.

전자에 언급한 기존 인공발들은 안정감은 있

으나 걸거나 달릴 때 높은 에너지의 소비를 유발하며, 빠른속도로 걸거나 달리게 되면 불안정감, 불편함으로 인하여 운동을 할수 없으며, 이로 인한 시간소비나 운동부족은 체중증가 및 기본적인 생활에 제한을 받게되어 이에 대한 개선의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다.

그러므로 에너지 저장형 인공발과 같은 새로운 개념의 인공발 개발은 하퇴 및 대퇴 절단자(amputee)들에게 자연스럽고 안정된 보행을 제공하며 에너지 소비를 줄여 신체를 위한 레크레이션 활동을 가능하게 한다. 특히, 빠른 보행이나 조깅, 약간의 등산, 불편없이 빠르게 달릴수 있도록 하는 것은 에너지 저장형 인공발 개발의 최우선 목표이다. 또한 절단 장애인이 보행동안 위협적인 주위 상황을 잘 극복하고 정신적 신체적으로 안정되게 보행운동에 적응하는 것이 무엇보다 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 한국의 보행 도로 지형 및 생활양식에 맞는 안전하고 편안한 에너지 저장형 인공발을 개발하는 것이다. 이를 위해 기존의 외산 인공발 및 최근의 선진외국에서 개발된 우수한 기능을 가진 인공발 등을 면밀히 분석하고 기능과 장단점을 비교 검토하고 그들의 기능상 장점만을 골라 국내 보행자 도로 여건 및 한국인 고유의 발 형태를 가진 한국형 에너지 저장형 인공발(KESF-1; Korea Energy Storing Foot No.1)을 개발 하였다.

방법 및 내용

1) 기본 원리

개발하고자 하는 에너지 저장형 인공발의 기본원리는 입각기(stance phase)보행시 체중심의 이동에 의한 인공발내의 탄성재(keel)가 활처럼 구부러지는 변형 포텐셜 에너지를 저장하여 Toe-off시에 운동에너지로 급격히 전환시키게 된다. 이 축적된 에너지는 다리를 밀어내어 신체를 앞으로 추진시키며 Toe-off를 원활하게 한다. 특히 에너지 저장형 인공발의 핵심요소인 탄성재는 일정범위의 체중정도에 따라 구부러져 체중제거시 다시 "spring back"작용을 한다.

2) 기존 각종 인공발의 장단점 비교

명칭	기능	장점	단점	적용
단축식	저,배굴	▶전방범퍼로 인한얼라인먼트용이 ▶저가 ▶후방범퍼의 강도 조절용이	▶배굴정지가 일어나기 쉬움 ▶부정노면에서의 적용이 어려움	▶무릎이 꺾여지기 쉬운대퇴절단자 ▶양쪽하퇴절단자등
SACH식	저,배굴 내,외반	▶가장널리사용 ▶경량, 저가 ▶소음이 없다. ▶착용이 쉽다 ▶외관이 좋다 ▶쉽게 신발과 조화용이	▶배,저굴곡의 한계 ▶heel cushion 강도 선택이 불가능 ▶장기사용 탄성감소 ▶heel contact 시 무릎꺾어짐 발생쉽다.	▶표준 하퇴절단자
다축식	저,배굴 내,외반 회내,외	▶부정노면의 대응이 쉽다. ▶운동성이 있다. ▶절단 부위에 가해지는 불쾌감이 적다	▶고가 ▶무거움 ▶유지보수 및 적용성요함 ▶소음 발생 ▶미용성이없음 ▶불안정성 발생	▶스포츠를 좋아하는 하퇴절단자
에너지 축적형	저,배굴	▶간단한 구조 ▶경량 ▶보수성이용이 ▶점프등 운동 가능 ▶보행시효율성	▶고가 ▶기능상의 제한	▶다축족과 동일

을 줄수 있으나, 반발력이 증가될 수 있다. 반면, 연질(soft type)일 경우 안정되고 부드러운 느낌을 줄수 있으나 반발력이 작아지므로 에너지 저장형 인공발의 가장 큰 장점인 활동성,운동성을 저해할 가능성이 있어 체중에 따라 적절한 경도를 가진 폼을 개발해야 한다. 개발기준은 노면 접지시 적절한 지면충격흡수와 입각기시의 자연스런 보행유도(natural walking flow), 환자의 심리적 보행 안정성에 주안점을 둔다.

나) 탄성재(Keel)의 주요기능은 인공발내에서 "spring back"작용을 하며, 활처럼 구부러지는 변형 포텐셜 에너지를 저장하여 Toe-off시에 운동 에너지로 급격히 전환시키게 된다. 이 축적된 에너지는 다리를 밀어내어 신체를 앞으로 추진시키며 적은 에너지로 보행을 원활하게 한다. 특히, Toe-off 시 무릎 구부러짐을 방지하고 전진 추진력을 발생(하퇴 삼두근과 족지굴근의 움직임 보상)시킨다. 체중에 따른 탄성한계는 족관절의 배굴각도와 Toe-break의 위치 및 보행저항의 결정하게된다. 이때 배굴정지 각도는 족저와 하중선이 이루는 각의 85° 정도이다.보통 설계는 보행분석연구로 부터 얻어진 각종정보를 바탕으로 결정되며 재료는 시험 분석 데이터에 따라 체중범위에 맞는 정적, 동적 stiffness 특성을 갖는 카본 복합재료로 구성된다. 탄성재의 개발기준은 입각기 동안의 체중에 따른 보행에너지의 원활한 저장과 되돌림(spring back), 자연스런 느낌과 안정성, 3년 정도의 내구수명, 가벼움, 경제성 등에 있다. 그림.1에서 보듯이 1차 탄성재와 2차 탄성재로 나누어지며 1차 탄성재의 탄성한계 이상의 하중변위에 대응하기 위해 2차 탄성재를 추가하였다. 2차 탄성재 선단의 rubber cushion은 1차 탄성재와 2차 탄성재가 급격히 접촉할 경우 소음을 방지하기 위한 것이다.

3) 인공발 개발시 부위별 기능 및 기준

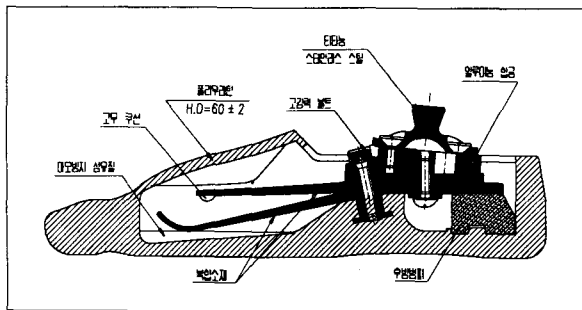


Fig.1 국산 에너지 저장형 인공발의 단면 조립도

가) Polyurethane heel cushion(후방범퍼)의 주요기능은 발의 Heel contact 시 저굴력을 흡수(전경골근의 운동보상)하고, 지면 반발력은 무릎(하퇴절단자), 또는 무릎관절에 굴곡방향으로의 힘을 발생시키므로, 무릎꺾어짐이 일어나기 쉽다.(대퇴절단자) 그러므로 고관절 의족이나 대퇴의족에는 반발력이 작아야 한다. 결국 범퍼의 폴리우레탄 폼이 경질(firm type)일 경우 환자에게 활동적인 적응성

다) 족관절부(ankle joint)는 foot block과 피라미트 어댑터로 구성되며 의지와 연결 및 얼라인먼트에 이용된다. 특히, 부정노면의 대응성을 갖게 되며 각종 보행충격을 흡수하고 인공발의 축고정성을 견고하게 한다. 전족부의 회내, 외와 족관절부의 내, 외반기능에 의해서 측방에의 분력을 흡수하고, 신체의 균형유지를 한다.

라) 인공발 외피(foot cosmetic cover)는 폴리우레탄 폼으로 구성되며 기능은 외형상 실제 한국인 발과 차이가 없는 미용성을 갖게되고, 자유로운 신축성으로 인한 인공발의 회내,외 및 내외반을 수행하여 보행 안정성을 도모한다. 도로의 부정노면에 대한 대응성을 강화시키고, 측방 분력 및 충격흡수를 용이하게 한다. 외형상의 조건으로는 외피의 구조가 신발착탈이 용이하여야 하고 발과 신발사이에 움직임이 최대한 적어야 한다.

마) 기타로 인공발 개발은 최대한 경량을 유지하여야 하며, 강도 및 내구성이 뛰어나야 한다. 도로구조에 따른 족관절의 전후방향에 가해지는 굽힘모멘트(보통 보행시 체중의 2.5 - 4배의 힘이 반복적으로 작용) 및 범퍼의 압축력에 관한 실험데이터가 도표.2에 나타내었다. 또한 실용성을 중시하여

구조가 단순하고, 모듈라 형으로 설계하여 부품보수가 쉽다.

4) 인공발의 특성실험

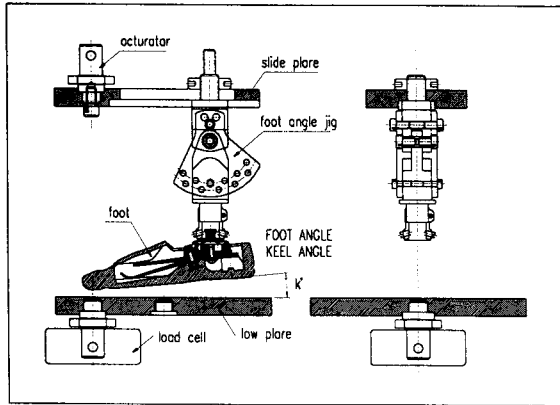


Fig.2 인공발 실험 구성도

에너지 저장형 인공발의 핵심요소는 포텐셜에너지를 저장해서 보행의 추진력으로 변환시켜주는 탄성재의 특성에 있다. 탄성재는 글라스 카본화이버계통의 복합재료이다. 탄성재의 정적특성은 보통 하중-변위선도로 나타낸다. 이 하중-변위선도를 구하기 위한 실험장치로 만능 피로시험기인 Instron 8511이 사용되었다. 그림.2는 각도변화에 따른 인공발의 특성을 시험하기 위해 고안된 지그이다. 지그의 각도변화는 10도 간격으로 할 수 있고 본 실험에서는 수평 바닥판과의 이루는각도가 10도, 20도, 30도로 변화를 주어 하중-변위선도를 작성하였다.

5) 인공발 외피(foot cover)의 개발

발의 외피는 사실적 미용성 외형상뿐만 아니라 발의 기능으로서도 매우 중요한 요소를 가지고 있다. 이런 외피의 이상적인 형상을 얻기 위해서는 앞서 설명한 여러인자들-사실적 미용성, 충격흡수성, 신축성, 신발의 적응성, 내구성, 내마모성 등을 두루 갖추어야 한다. 이를 위해 재질로는 폴리우레탄 폼을 사용하였다. 만드는 과정은 그림.3에서 보듯이 한국인 표준형의 발을 선택하여 석고외형을 제작하고 발의 내측은 탄성재와 같은 기구부가 동작할 수 있도록 적절한 3차원 형상의 코어(core)공간을 만들어 주었다. 이들을 적절히 수정보완하여 0.05mm간격으로 표면을 인식하는 3차원 레이저 스캐너를 사용하여 인공발의 형상을 구현할 수 있는 선과 면을 얻었다. 이를 토대로 적절한 수정과 편집을 거쳐 입체(solid)를 구하였다. 3차원 입체 데이터는 신속하고 정확한 발의 Prototype 을 얻기 위해 Rapid prototyping system을 적용하였다. Rapid prototyping system은 CAD파일을 이용해서 단시간에 모형을 제작하는 새로운 기술의 명칭으로 인체의 기하학적 형상을 정확히 표현하고 제작하기 위해 꼭 필요한 방법이다. 이 R.P 시스템공정은 수지를 경화시킴으로서 필요한 형상을 얻는다. 이 모형은 간이형 인공발 시제품을 만드는데 사용한다. 이러한 과정을 거쳐 그림.7과 같은 에너지 저장형 인공발을 개발하였다.

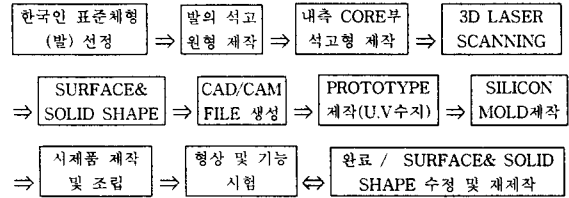


Fig.3 인공발 외피의 Prototype 제작과정

결과 및 고찰

탄성재(Keel)는 에너지 저장형 인공발의 주요기능인 "spring back"작용을 하며, 활처럼 구부러지는 변형 포텐셜 에너지를 저장하여 Toe-off시에 운동에너지로 급격히 전환시키게 된다. 이 축적된 에너지는 다리를 밀어내어 신체를 앞으로 추진시키며 적은 에너지로 보행을 원활하게 한다. 특히, Toe-off 시 무릎 구부러짐을 방지하고 전진 추진력을 발생(하퇴 삼두근과 족지굴근의 움직임 보상)시킨다. 체중에 따른 탄성한계는 족관절의 배굴각도와 Toe-break의 위치 및 보행저항의 결정하게된다. 이때 배굴정지 각도는 족저와 하중선이 이루는 각의 85° 정도이다. 보통 설계는 보행분석연구로부터 얻어진 각종정보를 바탕으로 결정되며 재료는 시험분석 데이터에 따라 체중범위에 맞는 정적, 동적 stiffness 특성을 갖는 카본 복합재료로 구성된다. 이 고분자 복합재료는 강화재로서 유리섬유(E-glass)와 탄소섬유(PAN계)를 사용하였으며, 이것은 우수한 기계적 성질을 지니고 있다. 유리섬유를 적층시킬 때 축방향 강도를 향상시키기 위하여 단축프리 프레그를 사용하였다. 탄소섬유는 PAN계로서 유리섬유와 마찬가지로 직포와 프리프레그를 사용하였다. 성형법은 압착법(compression molding)으로 금형을 만들어 탄성정도를 조절하기 위해 강화재의 적층도를 변화시켜 에폭시 수지를 사용하여 유리섬유계와 탄소섬유계의 탄성재를 제작하였다. 탄성재의 탄성한도는 환자의 체중 및 발의 크기에 따라 일정범위의 강성을 갖는 하중-변위곡선으로 나타낼 수 있다. 그림.4은 발의 크기가 178~230 mm인 경우로서 이에 적합한 4가지 체중분류에 따라 각 탄성재는 각기 다른 탄성특성의 기준을 갖게된다. 체중은 E(100~114kg), F(84~100kg), G(70~84kg), H(57~70kg)로 분류되며 체중이 커질수록 작용하중에 대한 변위관계는 탄성재의 강성률을 나타내는 데 점차 커짐을 알 수 있다. 그림.5는 족부크기가 254~280mm으로서 역시 A(94~110kg), B(82~94kg), C(68~82kg), D(57~68kg)의 4가지 체중으로 나누어지며 체중에 따른 하중-변위곡선의 경사가 점차 커지고 있다. 족부크기에 따른 비교에서는 족부크기가 클수록 강성률은 커지고 있다. 복합재료로 만들어지는 탄성재는 그림.4과 그림.5의 기준에 따라 제작되었다. 그림.6는 적층양에 따른 탄소섬유로 만들어진 탄성재의 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 대체로 체중에 따른 탄성기준을 만족하였다. 그림.7은 유리섬유로 만들어진 탄성재의 하중-변위곡선이다. 이들은 대체로 적층도(matrix)나 강화재에 따라 원하는 강성도를 만족시키고 있다.

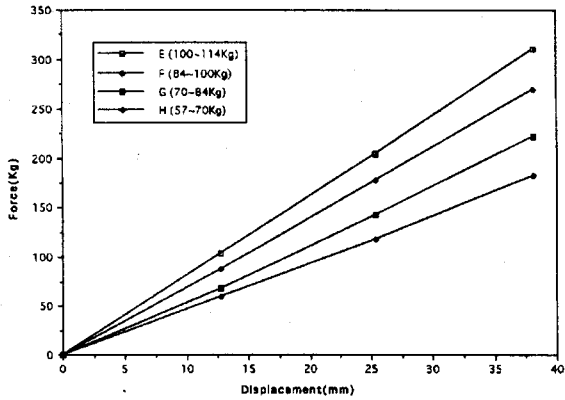


Fig.4 발의 크기가 178~230 mm인 경우 체중에 따른 탄성재의 하중-변위 선도

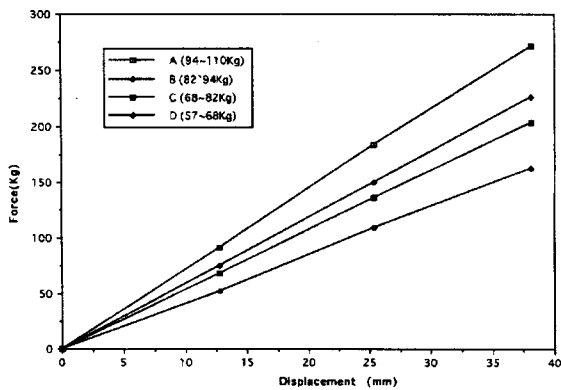


Fig.5 발의 크기가 254~280 mm인 경우 체중에 따른 탄성재의 하중-변위 선도

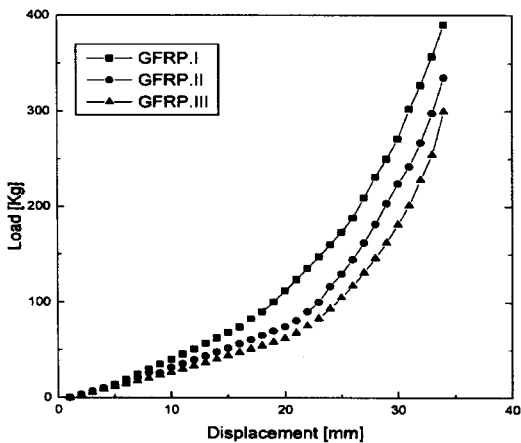


Fig.6 유리섬유로 제작된 탄성재의 하중-변위 선도

결론

본 한국형 에너지 저장형 인공발의 연구/개발은 현재 수만명에 이르는 대퇴 및 하퇴절단 장애인들이 레크레이션이나, 스포츠, 등산등과 같은 활동적인 행동에 제약을 크게 받지않고 자연스런 보행을 추구하는데 있다. 특히 유사한 종류의 외산 인공발은 한국인 체형과 다르고, 매우 고가로서 일반 절단장애인들은 열악한 국산 단축식 발을 착용

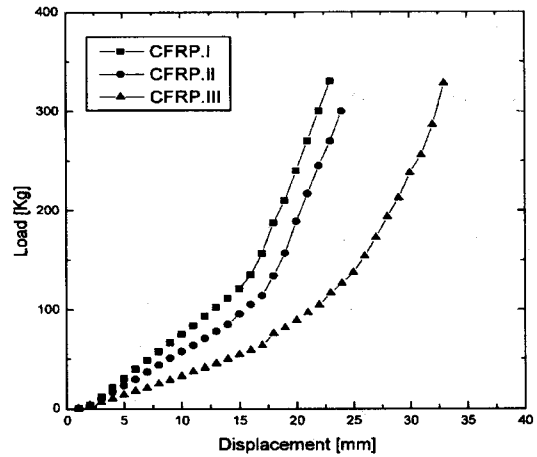


Fig.7 탄소섬유로 제작된 탄성재의 하중-변위 선도

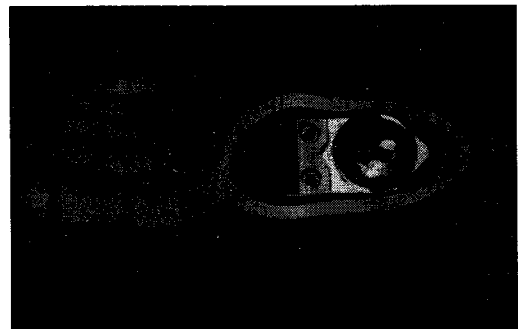


Fig.8 한국형 에너지 저장형 인공발(KESF-1)의 시제품

해 행동의 제약 및 이상 보행의 원인이 되고 있다. 본 인공발은 유리 및 탄소섬유재로 이루어진 탄성재의 고기능성(에너지 저장 및 추진기능)을 확인했으며, 한국인 체형에 맞는 사실적인 미용성과 기능을 갖춘 폴리우레탄 발 외피(foot cover)를 개발하였다. 또한 현재 보행분석 실험 및 임상평가 시험 중이다.

참고문헌

- Ernest M. B., et al., " Development and preliminary evaluation of the VA Seattle foot", J. of Rehab. Research & Development Vol.22 No.3 BPR 10-42 pp.75-84
- 澤村誠志, " 義肢學", 醫齒藥出版(株)
- 재단법인 테크노에이드협회, "3 의지장구편"
- ISPO : Standards for Lower-Limb Prostheses, Report of a Conference,1977
- H.W.L.Van Jaarsveld, et al., " Stiffness and hysteresis properties of some prosthetic feet.", Prosthetics & Orthotics International, 1990, 14,117-124
- J.C.H.Goh, et al., " Biomechanical evaluation of SACH and uniaxial feet.", Prosthetics & Orthotics International, 1984, 8, 147-154