

탄소복합소재(CFRP)를 이용한 하퇴환자용 인공발의 개발 Development of prosthetic foot with CFRP for transtibial amputee

*정성희¹, 김규석¹, 김종권¹, 조현석¹, 김신기¹, 문무성¹, 전기수²

*S. H. Jung(shjung@korec.re.kr)¹, G.. S. Kim¹, J. K. Kim¹, H. S. Cho¹, S. K. Kim¹, M. S. Mun¹, K. S. Chun²

¹ 재활공학연구소, ² 한일하이테크

Key words : Prosthetic foot, CFRP, Composite material

1. 서 론

절단에 의한 신체적 장애는 대부분 질병 또는 사고로 인하여 발생한다. 이러한 절단 장애인은 적절한 재활 훈련과 인공의족 또는 의수를 사용함으로써 손상된 기능의 일부를 회복시키거나 향상된 기능을 찾을 수 있게 된다. 특히 하지 절단 장애인들은 인공의족의 착용으로 신체의 균형 유지와 안전하고 자연스러운 보행을 하고자 한다. 또한 삶의 질이 향상되면서 장애인들의 건강한 삶에 대한 관심으로 장애인들의 스포츠 활동에 대한 욕구도 증가되고 있다. 이에 따라 미국과 유럽을 포함한 선진국들은 많은 종류의 인공발을 연구, 개발 해 왔으며 절단 장애인의 건강과 재활을 위한 스포츠 활동이 가능한 탄소복합재료를 이용한 에너지 저장형 인공발이 개발되어 상품화 되고 있다¹.

그러나 국내에서는 절단 장애인의 스포츠 활동이 가능한 인공발의 개발이 전무한 상태로 대부분의 스포츠용 의족은 외국제품의 수입에 의존하고 있으며 이들은 서양인의 신체적 특성에 맞추어 제작됨에 따라 한국인의 체형 조건과 생활방식에 적합하지 않은 면이 있다. 본 연구의 목적은 스포츠 인공발의 국산화의 일환으로 한국의 생활양식과 한국인의 체형에 적합하고 보다 활발한 스포츠 활동이 가능한 인공발을 개발하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 외국제품의 특성을 분석하여 시뮬레이션을 통해 한국형 스포츠용 인공발을 설계하였다. 탄소섬유 복합재료를 이용하여 인공발용 keel 재를 적절한 적층 방법과 성형 방법으로 성형한 후 적층패턴에 따른 각각의 기계적 물성을 비교하여 한국인의 보행 패턴에 적합한 인공발용 keel 재를 개발 하였다.

2. 연구내용

에너지 저장형 인공발의 기본 원리는 입각기 보행 시 체중심의 이동에 의한 인공발 내의 keel 재가 활처럼 구부러지는 변형 포텐셜 에너지를 저장하여 Toe-off 시에 운동에너지로 급격히 전환 시키게 된다. 이 축적된 에너지는 다리를 밀어내어 신체를 앞으로 추진 시키며 Toe-off 를 원활하게 한다. 특히 에너지 저장형 인공발의 핵심요소인 keel 재는 일정범위의 체중 정도에 따라 구부러져 체중 제거 시 다시 spring back 작용을 한다².

기존 외산 인공발은 탄성 및 강성이 뛰어난 탄소복합재료를 이용하여 제작되었기 때문에 착지 시 충격량을 흡수하고 충격량을 탄성에너지로 저장시켜 도약 시 저장된 에너지를 방출할 수 있는 구조로 필요한 역할을 수행할 수 있도록 고안되었다. 본 연구에서 개발하고자 하는 인공발은 탄소복합재료를 사용하여 체중에 의한 내구재의 변형으로 배굴운동이 됨으로써 입각기 시의 안정성과 배굴운동에 의한 효과적인 제한을 가능하게 하는 생활스포츠용 인공발 구조로 설계하였다. 인공발은 2 층의 keel 재 구조로 되어 있고 상판과 하판은 우레탄 접착과 볼트에 의해 조립되어 있고 하퇴와의 연결을 위하여 인공발 상부에는 금속 어댑터가 설치되어 있다. 금속 어댑터는 경량화를 위해 알루미늄으로 제작되며, 연결을 위한 피라미드는 고강성 티타늄 합금으로 가공하였다. Fig.1 은 개발된 인공발의 조립 시제

품이다.



Fig. 1. Energy Storing Prosthetic Foot

탄소복합재료는 탄소섬유에 B-stage 의 에폭시 레진을 미리 함침 시켜 적절한 두께 및 레진 함량으로 제작한 프리프레그를 금형에 적층하여 Hot press 방식과 Autoclave 방식으로 제작하게 되는데 프리프레그의 레진함량과 섬유의 배열각도 등에 따라 기계적 물성에서 차이가 난다³. 탄소섬유 프리프레그는 일반강도 24 톤 탄소섬유 필라멘트를 일방향으로 배열한 Uni-directional(UD, USN150A, RC 36%, SK chemical, Korea) 와 1:1 평직으로 직조한 직물프리프레그(Woven, WSN3K, RC 41%, SK chemical, Korea)의 두 가지 형태의 프리프레그를 사용하였으며, 설계된 keel 재의 도면 두께에 탄소섬유 프리프레그는 keel 재의 변형 방향에 따라 UD 를 길이 방향에 수평방향 즉 0 도 방향으로 적층 배열하였다. 형상가공 및 드릴 가공에 프리프레그의 들뜸이나 이탈을 방지^{3,4} 하고 keel 재의 modulus 를 변화시키기 위하여 woven 층의 배열 각도(90 도, 45 도)와 ply 수에 변화를 주어 적층하였고 각 시편의 적층 구조는 Table 에 나타내었다. 성형방법은 프리프레그 제조사에서 제공하는 성형공정표에 따라 Hot press 방식으로 성형하였다.

Table 1. Specimen of keel by various woven prepreg layout

	A	B	C	D
Woven 배열각도(°)	90	90	45	45
Woven ply	42	6	42	14

복합재료는 레진과 섬유의 함량에 따라 탄성과 강도, 내구성이 차이 나므로 복합재료를 성형 후 시편을 절단하고 460°C furnace 에서 4 시간 연소시킨 후 무게를 측정하여 레진 함량(Resin content, RC)을 비교하였으며 적층 단면을 현미경으로 관찰함으로써 제품의 탄성과 강도를 예측하였다.

성형판은 설계된 인공발의 도면에 따라 water jet 가공으로 형상을 가공하였으며 상판과 하판의 접착은 우레탄 접착과 볼트로 체결하였다.

보행 시 발생하는 발의 각도(Heel contact 20, 10, foot flat, Toe contact 10, 20)에 따른 변위 대 하중에 대한 실험을 인장시험기(Instron 8511, Instron, USA)를 이용하여 각도 별로 측정할 수 있는 시험 지그를 제작하여 시험하였다. 본 연구에서는 입각기 단계의 Toe off 시에 하중을 가장 많이 받기 때문에 Toe contact 20 도에 대해 시험하였다. Toe 부분을 바닥에 접촉하고 아답터 부분의 각도를 20 도를 들어 고정하고 지면에 수직한 방향으로 5mm/sec 의 속도로 하중을 가하였다. Fig 2 는 Toe contact 20 도의 시험을 위해 시험편을 고정한 시험 지그 및 장치이다.

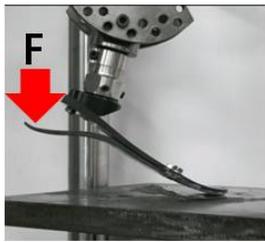


Fig. 2. Static test zig of prosthetic foot

3. 연구 결과

인공발의 keel 재가 효율적으로 에너지를 저장하고 방출시키는 역할을 하기 위해서는 가해지는 하중에 대해 일정한 변형이 생겨야 하므로 keel 재를 성형하기 위한 프리프레그의 레이아웃 설계가 중요한 요인이 된다. Woven 층의 배열각도와 ply 수에 따라 달라진 레진의 함량(RC)은 keel 재의 탄성과 강도에도 영향을 주었다. Fig. 3은 각 keel 재의 레진의 함량을 측정된 결과이고 Fig. 4는 각 keel 재의 toe contact static test 결과이다.

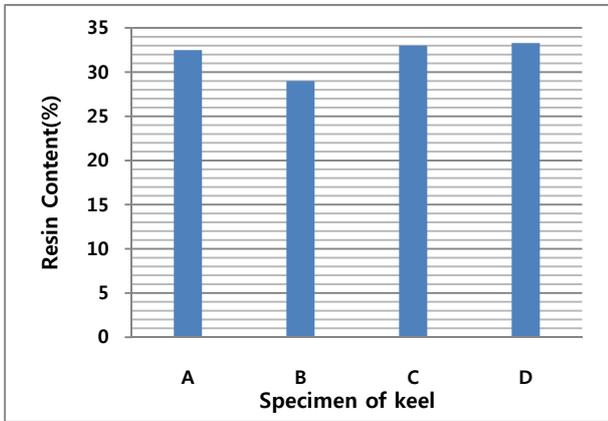


Fig. 3. Resin contents of various prepreg layout

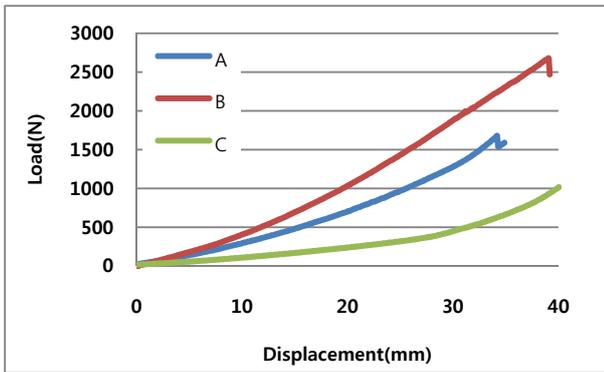


Fig. 4. Toe contact 20 static test of upper keel

Woven 층의 ply 수가 가장 적은 B의 RC가 29% 정도이고 나머지 A, C, D는 모두 33% 정도로 나타났다. A와 C는 모든 프리프레그를 woven 층으로만 구성하고 ply는 동일하게, 배열각도를 달리 적층하는데 RC는 유사하나 변위-하중 곡선에서는 상당한 차이를 볼 수 있다. 이것은 woven 층을 0도로 배열하게 되면 90도 방향의 fiber는 0도 fiber의 변형에 방해가 될 뿐 아니라 강도에도 영향을 주지 못하기 때문이다. B의 경우는 UD와 woven 층의 비율을 56:6(90도)로 배열하였는데 실제 인공발을 제작하기 위한 적층 구조이다. UD 층의 수가 많아짐에 따라 RC가 감소하여 keel 전체가 딱딱해지면서 modulus가 상당히 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 B와 D의 upper keel에 하판을 접착한 후 인공발로 제작하여 static test를 한 결과이다.

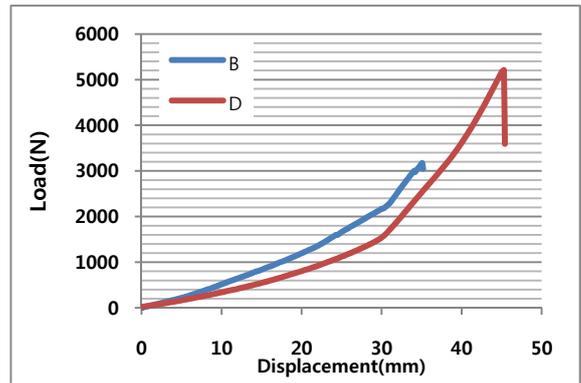


Fig. 5. Toe contact 20 static test of prosthetic foot

체중이 80kg인 장애인이 보행 시에 keel 재가 변형되는 구간은 20mm 정도인데 B의 경우는 15mm 구간에서 변형이 발생되어 중간 입각 시 에너지를 저장할 시간이 짧아지게 되어 강성이 높아져 신체로 전달되는 충격량이 커지게 된다. 또한 80kg 성인 남성을 기준으로 하였을 때 keel 재의 파단강도는 안전율을 고려하여 약 4000N의 하중을 견뎌야 한다. 파단 강도를 높이기 위하여 1차 keel 재보다 두께를 약 25% 정도 증가시켜 D를 제작하였을 때 인공발의 최대 파단강도는 5100N까지 증가하는 결과가 나타났다.

이러한 결과는 복합재료의 탄성과 강도를 결정짓는 주요 요인이 레진의 함량으로 전체 무게의 33% 정도를 유지함을 알 수 있다. 그 이유는 탄소섬유는 취성이 강한 데 비해 상대적으로 유연한 물질인 레진이 섬유 사이에서 응력을 전달하고 복합재료의 압축강도 향상에 크게 기여하기 때문이다⁴.

4. 결론

본 연구는 탄소복합재료를 이용한 한국인의 체형에 맞는 에너지 저장형 인공발을 개발함에 있어 탄소섬유의 배열각도와 ply 수를 조절함으로써 레진의 함량을 조절하고 keel 재의 탄성과 강도를 조절할 수 있었다. 인공발은 길이 방향에 대한 변형이 주로 일어나기 때문에 keel 재를 구성하는 UD 층은 길이 방향에 수평하게 배열하고 Woven 층은 45도로 배열함으로써 keel 재가 더 잘 변형될 수 있도록 하였다. 또한 파단강도를 증가시키기 위하여 keel 재의 두께를 25% 증가시키고 그에 따른 UD 층과 woven 층의 비율을 49:14로 함으로써 섬유와 레진의 비율을 67:33으로 맞추어 성형하였다. 그 결과 modulus는 25% 정도 감소시키고 두께를 증가시킨 2차 keel 재의 파단강도는 약 60% 정도 증가시킨 인공발 keel 재를 제작할 수 있었다.

참고문헌

1. 장윤희, 배태수, 김신기, 문무성, “하퇴절단자용 단축식 발과 스포츠용 에너지 저장형 발 보행 특성 비교연구,” 한국정밀공학회지, 26, 126-132, 2009.
2. Sanderson, D.J. and Martin, P.E., “Joint Kinetics in Unilateral Below-Knee Amputee Patients During Running,” Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 77, 1279-1285, 1996.
3. Lee, S. C., Jeong, S. T., Park, J.N., Kim, S.J. and Cho, G.J., “A Study on Mechanical Properties of Carbon Fiber reinforced Plastics by Three-point Bending Testing and Transverse Static Response,” Journal of materials processing technology, 201, 761-764, 2008.
4. 이대길, 정광섭, 최진호저”복합재료 역학 및 제조 기술”, 시그마프레스.