# 탄소복합소재 인공발 유한요소해석 모델의 개발

# Development of Finite Element Analysis Model for Carbon Composite Prosthetic Feet

*#조현석[1], 차국찬[1], 박진국[1], 김신기[1], 문무성[1]

*#H. S. Cho[1](hscho@korec.re.kr), G. C. Cha[1], J. K. Park[1], S. K. Kim[1], M. S. Mun[1]

[1]근로복지공단 재활공학연구소

Key words : energy storing feet, graphite, prosthetic feet, laminate composite

## 1. 서론

하지절단 장애인의 기능회복을 위한 인공의지는 무릎관절, 인공발, 소켓 등으로 구성되는데 이 중 인공발은 손실된 발과 발목관절의 기능을 수행하게 된다. 인체에서 발과 발목은 보행 시에 안정된 체중 지지, 전진 동력의 생성, 충격 흡수 등 매우 중요한 역할을 한다. 인공적인 시스템으로 이러한 기능을 제대로 구현하려면 동력장치 및 에너지원이 필요하다. 동력형 족관절이 개발되었으나 비용문제로 인하여 실질적인 인공발 시장은 탄성에너지를 이용한 무동력 방식이 주를 이루고 있다. 무동력식 인공발은 입각기의 heel contact 시점과 mid-stance 시점에 체중에 의해 발생하는 위치 에너지를 탄성변형체에 저장했다가 toe off 때 방출하는 메커니즘을 사용하여 보행 시 사용자의 신체 에너지 사용을 최소화하는 방향으로 개발되어 왔다.

2000년대 초반부터 인공발에 주로 사용되기 시작한 복합소재는 고가의 제작비용과 노동집약적인 제작공정에도 불구하고 비강성 및 비강도가 우수한 특징으로 인하여 현재 인공발 분야에서 독보적으로 사용되는 소재로 자리매김을 하였다. 적용 초기에 유리-에폭시 복합소재가 사용되다가 현재는 탄소-에폭시 복합소재로 변화가 이루어진 상태이다. 과거 10여 년간 전 세계적으로 형태 및 기능별로 다양한 종류의 탄소 복합소재 인공발이 개발, 공급되고 있다.

입각기 기간 동안 단계별로 인공발의 변형 응답특성이 잘 구현되어야 안정된 보행과 최소화된 신체 에너지 소모를 달성할 수 있다. 이러한 요구 조건은 기계적인 관점으로 접근했을 때 하중의 방향 및 크기에 따른 변형 응답특성이 주어진 보행특성에 맞아야 한다는 점으로 귀결된다. 본 연구에서는 인공발의 설계에 가장 중요한 탄소복합소재 인공발의 하중 응답특성을 평가하고 설계에 반영할 수 있는 유한요소해석모델의 개발 및 시뮬레이션 모델의 검증을 목적으로 한다.

## 2. 연구내용

본 연구에서 개발하고자 하는 복합소재 인공발 모델을 그림 1에 나타내었다. 탄소복합 프리프레그(prepreg) 적층구조로 제작된 2개의 킬재로 구성된다. 발목관절의 굴곡-신전 역할은 외팔보 상태의 상판으로 구현하며, 하판은 heel contact시 바닥면 충격 흡수와 서있을 때 안정성 유지 기능을 한다. 불규칙 지면에서의 적응 목적으로 킬재 중심부를 절단하여 안쪽과 바깥쪽이 독립적인 거동을 나타낸다. 사용된 탄소복합소재 프리프레그는 단방향(Uni-Directional) 탄소섬유와 직조된(Woven) 탄소섬유와 에폭시 수지를 사용하였다. 상판의 경우 약 70~80장의 프리프레그가 적층되며, 하판의 경우 30~40장의 프리프레그가 적층된다. 킬재의 길이방향으로 두께를 변화시켜서 하중 조건에 따른 강성을 조절한다. 두께 변화는 적층하는 프리프레그 길이 변화를 의미하며 연속된 층간 길이 차이는 2~3mm 수준이므로 정밀한 적층이 요구된다.

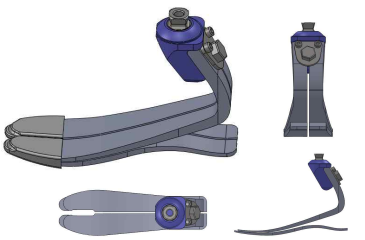

Fig 1. 3D model of developed carbon composite prosthetic feet

복합소재 인공발의 유한요소 해석모델은 시편 시험을 통한 복합소재의 물성획득, 인공발 적층모델 구현, 그리고 시뮬레이션 조건인 입각기 단계별 응답특성의 제시 등으로 구성된다.

복합소재의 물성획득을 위하여 시편을 제작하고 3점굽힘시험을 수행하였다. UD 및 Woven의 두 가지 시편에 대하여 두께를 달리하여 굽힘 전단 특성을 획득하였다.

시뮬레이션은 ABAQUS™를 이용하여 수행하였으며 물성모델은 횡등방성 물성모델인 Elastic Lamina를 사용하였다. 물성획득을 위하여 시편시험과 동일한 조건의 시뮬레이션 모델을 구성하여 변위-하중 특성이 근사하는 물성값을 획득하였다. 적층모델은 ABAQUS™의 Conventional shell 방식의 Composite Layup 모델을 이용하여 구현하였으며, 킬재의 두께방향의 중간평면에 해당하는 shell 모델에 적층되는 프리프레그의 길이에 따른 분할을 통하여 적층을 수행하였다.

Heel contact 시점부터 Toe off 까지의 입각기 동안 지면에 대한 발바닥면의 각도는 약 -20°~ 20° 까지 변화하는데 이를 -20°, -10°, 0°, 10°, 20°의 5가지 단계로 나누어 수직하중에 대한 정적 해석을 수행하였다. 각 각도에서의 하중-변위 특성을 유사한 형태의 성능이 검증된 기존 인공발(Sierra™, Freedom社 제품)의 특성과 비교하였다.

## 3. 연구결과

시편 시험 및 획득된 물성을 적용한 동일 조건의 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 실험결과가 고하중에서의 비선형적 특성은 층분리에 따른 파단이 진행된 것을 의미하며 시뮬레이션 모델은 파단특성을 배제되었기 때문에 탄성구간에서는 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 획득된 물성을 적용한 시뮬레이션 수행 결과인 foot flat 상태의 변형 모습 및 응력분포양상을 그림 3에 나타내었다.

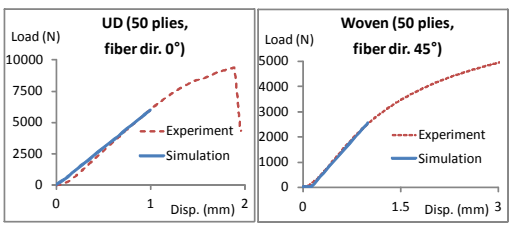


Fig 2. 3 point bending test results of carbon composite laminate specimens

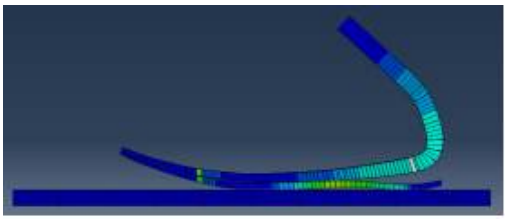

Fig 3. Von-mises stress distribution of deformed prosthetic feet in foot flat position

각도별 정적해석 수행 결과 하중-변위를 비교한 결과 대체적으로 실험과 시뮬레이션 결과가 일치하고 있다. Toe 20°에서 600N 이상의 결과에서 차이가 발생하고 있다. 이는 Toe 20°의 경우 다른 각도보다 변형량이 커지는 조건이어서 대변형에 따른 오차로 예측된다. 이는 사용된 복합소재 적층 모델이 평면응력 조건을 위한 것이어서 두께가 다소 두꺼운 인공발 킬재의 경우에 대변형에서 오차가 발생하는 것으로 보인다.

## 4. 결론

본 연구에서는 탄소복합소재 인공발 개발을 위하여 프리프레그 적층 설계에 따라 보행 시 하중특성을 예측할 수 있는 유한요소 해석모델을 개발하였다. 실제 제품과의 하중특성 비교결과 고하중 영역에서는 다소 오차가 발생하였으나 체중레벨에서는 큰 차이가 발생하지 않았다.

## 참고문헌

1. D. Winter, Energy generation and absorption at the ankle and knee during fast, natural and slow cadences, Clin. Orthop., 175, 1983, 147-154.

2. A. Hansen, D. Childress, S. Miff, S. Gard & K. Mesplay, The human ankle during walking: Implications for design of biomimetic ankle prostheses, Journal of Biomechanics, 37, 2004, 1467-1474.

3. A. Barr, K. L. Siegel, J. Danoff, C. McGarvey, A. Tomasko, I. Sable, & S. Stanhope, Biomechanical comparison of the energy storing capabilities of Sach and Carbon Copy II prosthetic feet during the stance phase of gait in a person with below-knee amputation, Physical Therapy, 72(5), 1992, 344-354.