

유한요소법을 이용한 공기 순환 방식의 골프화 설계에 관한 연구

송우진* · 김용욱* · 문병영** · 강범수***

1 Analysis of Outsole in Golf shoes by using Finite Element Method

W.J.Song, Y.U.Kim, B.Y.Moon and B.S.Kang

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Outsole(아웃솔), Midsole(미드솔), Ogden type(오그덴 타입), Strain Density Function(변형률 밀도 함수)

Abstract

This paper presents the analyzing method of golf shoes and shows design technique including air-cycled pump in the midsole. The golf shoes are analyzed by using the finite element method for the optimization in design by considering the configuration of midsole and outsole, which compose the golf shoes. Also the optimum size of air-cycled pump in the midsole is examined. Standard human pressure values for boundary conditions are adopted for the finite element analysis. The unknown constants of the strain energy function of Ogden type are observed in accordance with the axial tension test. By using the commercial FEM software for nonlinear analysis, MARC V7.3, the strains and the values of volume change for midsole and outsole are obtained, respectively. As a result, it can be concluded that these values in the midsole and the outsole are different depending on the characteristic of elastomer. More precise investigation about the assembly of two parts, which represent midsole and outsole, is under studying.

1. 서 론

최근 골프 인구의 증가로 인하여 급격한 소비 증가가 예상되는 골프화 시장에, 값싸고 고기능의 골프화의 수요가 요구되어 지고 있다. 그러나, 현 국내 골프 용품 시장에는 대부분의 골프화가 외국의 유명 제품을 수입되고 있는 실정이다. 국내 신발 생산 중소 기업은 자체 생산 기술을 바탕으로 몇몇 모델의 수출이 진행 중이나, 그 개발 기술의 대다수는 기본 개발 시스템을 갖추지 못하고 국외의 기술을 도입하는 것이 현 국내 중

소 업체의 현실이다. 골프화를 구성하고 있는 인솔(Insole), 미드솔(Midsole), 아웃솔(Outsole) 등의 재질 선택 및 인체 공학을 근거로한 구조 설계, 그리고 각각의 구성 단품을 이루는 소재의 배치 등에 대한 체계적인 해석 및 연구는 이루어지지 않고 있다. 일반적으로 신발 하단부의 구조는 발의 바닥 부분과 직접 접촉을 하는 인솔과 지면과 직접 접촉을 하게 되는 아웃솔, 그리고 인솔과 아웃솔 사이에서 신발 착용자의 피로감 및 지면과의 접촉으로 인해 발생하는 하중을 완화시키는 역할을 하는 미드솔로 구성되어 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

본 연구에서는 신발의 구성 부품 중에서 지면과의 직접적인 접촉을 이루고 있는 아웃솔과 일반적인 미드솔로 구성된 것에 대해 신체의 하중이 작용할 때의 변형량과 미드솔 내에 지면과의

* 부산대학교 항공우주공학과

** 정회원, 부산대학교
항공우주공학과

*** 정회원, 부산대학교 정밀정형 및
금형가공연구소

접촉시 하중에 대한 반대 하중을 최소화하고 신발 내부의 공기 순환을 극대화시키는 기능을 하는 공기 순환식 펌프역할의 내부 영역이 존재할 때의 변형량을 상호 비교하고자 한다. 먼저, 본 논문에서는 기존 미드솔 및 아웃솔 형상을 유한요소 기법을 토대로 한 3차원 모델링을 실시하고, 신체의 하중을 경계 조건으로 한 유한요소해석을 실시하여 이러한 미드솔 및 아웃솔을 구성하고 있는 탄성체 재료의 거동을 확인하여 설계에 반영하고자 한다.

2. 유한요소 모델링 및 탄성체 재료의 거동 특성

실제 해석에 사용된 모델은 인솔과 직접 접촉하는 미드솔 영역에 공기순환식 펌프 공간을 가지고 있는 것으로, 미드솔은 일반 탄성체인 고무보다 연성이 더욱 강한 파이론(Phylon) 재료로 구성되어 있고, 아웃솔은 전형적인 복합 고무재료로 구성되어 있다. 본 장에서는 해석에 사용될 형상의 3차원 유한요소 형상 생성에 관한 것과 각각의 구성 재료인 탄성체의 거동 특성에 대해 서술하였다.

2.1 유한요소 모델링

본 논문에서 해석되어진 미드솔과 아웃솔 형상은 대체적으로 많은 곡면의 조합으로 구성되어 있어 유한요소 형상으로 표현하는데 많은 어려움이 따른다. 따라서, 초기 3차원 콘트롤 볼륨은 전문 모델링 프로그램 - CATIA - 를 이용하여 구현한 뒤, 유한요소 해석에서 사용될 FE 데이터를 구하는 방식을 이용하였다. Figure 1은 해석에 사용되어진 각각의 유한요소 형상을 나타내고 있다. Figure 1에서 알 수 있듯이 현재 유한요소 형상에는 공기 순환용 펌프가 생략되어져 있다.

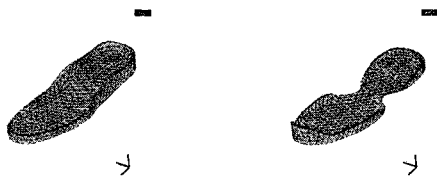


Fig. 1 Mesh Generation of Midsole, Outsole

해석에서는 4절점 3차원 입체 요소를 사용하였다. 요소 타입은 Full & Herrmann Formulation Tetra 157이다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 그리고, 해석에 사용된 각각 형상의 요소 수와 절점의 수는 Table 1에서 알 수 있다.

Table 1 Data in mesh generation

	No. of Elements	No. of Nodes
Midsole	2644	955
Outsole	2484	913

2.2 탄성체 거동 특성 및 재료 상수 결정

고무와 같은 탄성체는 거동 특성상 비선형성, 비압축성 및 대변형 특성을 띄기 때문에 일반 재료의 변형 양상을 나타내는 것과 같이 거동 특성을 표현하기에 상당한 어려움이 따른다.⁽⁵⁾ 이에 이러한 탄성체의 거동 특성은 변형을 에너지 함수를 이용하여 표현되어 진다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 이러한 초탄성 및 비선형성 탄성체의 거동 특성을 표현하는데 가장 널리 사용되어지는 오그덴 타입(Ogden type)의 변형을 에너지 함수는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} J^{-\alpha_n/3} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + 4.5K(J^{-1/3} - 1)^2 \quad \text{-----}(1)$$

여기서, W는 변형률 에너지를 나타내며, μ_n, α_n 는 각각 탄성체 거동 특성을 표현하는 재료 상수를 나타낸다. K는 탄성체의 벌크 상수를 나타내며, J와 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 탄성체의 변형률 불변량을 나타낸다. 이 때, 변형을 에너지 함수의 거동 특성을 표현하는 재료 상수를 결정하기 위해 탄성체 시편에 대한 몇 가지 기본적인 시험이 먼저 수행되어야 한다. 시편 시험의 종류에는 단축 인장, 단축 압축, 2축 인장 그리고, 단순 전단 시험 등이 있다. 본 논문의 해석에서는 단축 인장 시험을 통해 얻어진 응력-변형률 데이터를 이용하여 각각의 탄성체 거동 특성을 표현하는 재료 상수를 결정하였다. Figure 2는 미드솔과 아웃솔의 시편을 이용한 응력-변형률 시험 데이터를 나타낸다. 유한요소해석은 비선형 유한요소해석 상용

패키지 MARC V7.3을 이용하여 수행하였다.

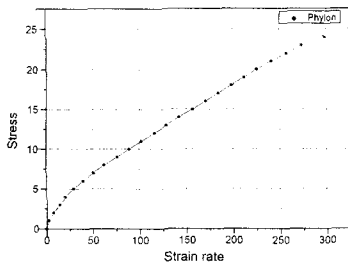
Table 2, 3는 본 해석을 수행하는 데 사용되어진 미드솔 재질인 파이론과 아웃솔 재질인 고무의 거동 특성 상수들이다.

Table 2 Material Property - Midsole [Phylon]

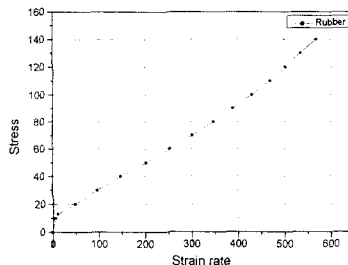
	Ogden type [kg/cm ²]	
# of terms	2	
Bulk modulus	2067.08	
moduli	0.434803	-0.0347568
exponents	1.70087	-2.51133

Table 3 Material Property - Outsole [Rubber]

	Ogden type [kg/cm ²]		
# of terms	3		
Bulk modulus	8.82929 e6		
moduli	0.260915	33920.8	427019
exponents	1.97898	-0.0524148	0.00410578



(a)Phylon-Midsole



(b)Rubber-Outsole

Fig. 2 Data on the axial tension test

3. 유한요소 해석

본 장에서는 골프화용 미드솔 및 아웃솔형상의 정적 해석 수행시 적용되어진 각각의 경계조건 (구속 조건, 하중 조건) 에 대한 내용과 수행된 해석의 결과에 대해 서술하였다.

3.1 경계 조건 I - 구속 조건

실제 미드솔과 아웃솔의 구성은 하나의 재질과 같이 거동될 수 있도록 서로간의 접촉 조건이 완벽하게 이루어져 있다. 따라서, 해석상에서는 미드솔의 하단부와 아웃솔의 상단부에 위치하는 요소의 절점이 서로 공유되어 해석에서 구해지는 값들의 연속성이 유지되어야 한다. 그러나, 현재 형상 모델링 상태는 미드솔과 아웃솔이 각각 형성되어 있는 상태이다. 본 논문에서는 각각 미드솔과 아웃솔에 대해 해석이 수행하였다. 미드솔은 아웃솔 상단부와 접촉되어지는 부분의 절점들을 구속시키고, 아웃솔에서는 지면과 접촉하는 부분의 절점들을 구속시키는 경계조건을 부여하였다.

3.2 경계 조건 II - 하중 조건

골프화용 미드솔 및 아웃솔에 대한 해석시 적용된 하중 조건은 한국 신발 연구소에서 보유하고 있는 일반인의 신발 착용시의 표준화된 압력 데이터를 적용하였다. Figure 3은 일반인 체중 조건에 의해 발생하는 압력의 표준화된 값들을 보여 주고 있다. 이를 이용하여 해석에 사용된 하중 조건을 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

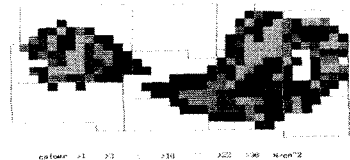
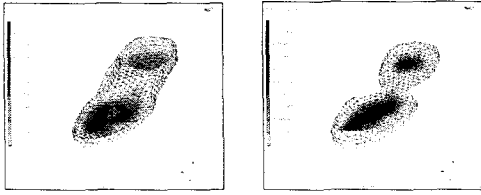


Fig. 3 The standardized pressure data

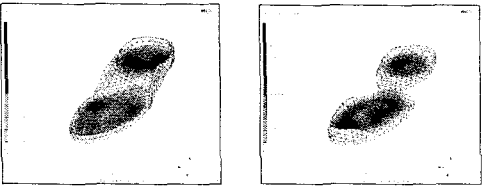


(a) Midsole (b) Outsole

Fig. 4 Boundary condition - pressure

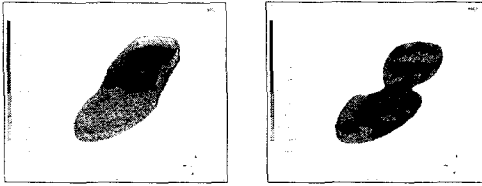
3.3 유한요소 해석 결과

해석은 일반인에 의해 신발 내부에 발생하는 표준화된 압력조건으로 미드솔과 아웃솔에 대해 각각 해석이 수행되어 졌다. Figure 5는 이러한 하중 조건 하에서 탄성체에 발생하는 Equivalent Cauchy Stress 분포를 보여 주고 있다. 실제 압력이 가해질 때 발의 뒷꿈치 영역에서 더 큰 응력 분포가 발생하고 있음을 알 수 있다. 유사한 거동 특성을 가지는 탄성체 중에서 아웃솔을 구성하고 있는 고무 재질의 경우가 미드솔을 구성한 파이론 재질보다 유연성이 더 떨어지기 때문에 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 체적 변화량이 미드솔에서 보다 좀 더 균일하게 발생함을 알 수 있다. 반대로, 유연성이 강한 미드솔에서는 체적 변화량이 특정 영역에 집중되어 발생함을 확인할 수 있다.



(a) Midsole (b) Outsole

Fig. 5 Equivalent cauchy stress



(a) Midsole (b) Outsole

Fig. 6 Volume Change

4. 결론

본 연구의 해석에 사용되어진 골프화용 미드솔과 아웃솔의 복잡한 형상으로 인해 미드솔과 아웃솔의 조합된 형상에 대해서는 유한요소 모델링이 아직 완료되지 않은 상태이다. 그런 이유로 인해 발의 압력 하중에 대한 미드솔 내 공기순환 펌프의 존재 유무에 따른 전체 변형량 분포 결과는 비교되지 못하고 있다. 그러나, 현재까지의 해석 결과로 유사한 비선형 거동 특성을 가지는 탄성체에서 유연성 정도에 따라 동일한 하중 조건하에서 체적 변화량의 분포가 다르게 나타남을 알 수 있다. 즉, 유연성이 뛰어난 탄성체 내에서는 체적 변화량이 특정 영역에 편중되는 현상이 발생한다.

본 연구는 지금까지의 해석 결과를 바탕으로 향후 인솔과 아웃솔의 사이에 존재하는 미드솔 내부에 공기순환 펌프의 유무에 따른 전체 형상의 변형률 및 체적 변화량 분포에 대한 분석을 실시하고, 이를 이용하여 미드솔 내 공기순환 기능의 펌프에 대한 최적 구조 및 위치를 도출하는데 그 목적을 두고 있다. 그리고, 공기순환 펌프의 구조 및 위치에 따른 아웃솔의 최적 형상 설계도 실시할 것이다.

후기

본 연구는 Brain Korea 21 Program의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Alan N. Gent, 1984, "Engineering with Rubber".
- (2) David Lemmon, T.Y.Shiang, Azfar Hashmi, Jan S.Ulbrecht, Peter R.Cavanagh, 1997, "The Effect of Insoles in Therapeutic Footwear - A Finite Element Approach", J. Biomechanics, Vol.30, No.6, pp.615-620.
- (3) MARC Vol.A User Information, 1994, MARC Analysis Research Corporation.
- (4) MARC Vol.B Element Library, 1994, MARC

Analysis Research Corporation.

- (5) 김현영, 최종윤, 김종재, 1997, “고무 · 포음 부품의 변형 거동 예측과 형상 설계”, 대한기계학회, 고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집, pp.14-24.
- (6) 신수정, 이태수, 오수익, 1998, “고무패드 변형의 3차원 유한요소해석(1)”, 대한기계학회지, Vol.22, No.1, pp.111-120.
- (7) 신수정, 이태수, 오수익, 1998, “고무패드 변형의 3차원 유한요소해석(2)”, 대한기계학회지, Vol.22, No.1, pp.121-131.
- (8) 신수정, 이태수, 오수익, 1998, “고무 패드 성형 공정의 유한요소 모델링”, 한국정밀공학회지, Vol.15, No.9, pp.117-126.