

## 유한요소법을 이용한 신발의 열전달 해석 및 설계

문 병 영<sup>†</sup> · 김 병 수<sup>\*\*</sup>

\*부산대학교 항공우주공학과 · \*\*인제대학교 기계자동차공학부  
(2003년 3월 12일 접수, 2003년 7월 31일 수정 및 채택)

### Heat Transfer Analysis and Design of Shoes Using Finite Element Method

B. Y. Moon<sup>†</sup>, B. S Kim<sup>\*\*</sup>

Department of Aerospace Engineering, Pusan National University  
School of Mechanical and Automotive Engineering, Inje University  
(Received March 12, 2003, Accepted & Revised July 31, 2003)

요 약 : 본 논문에서는 인솔에 coolant가 있는 골프화에 대해서 이론적인 해석방법과 설계기술을 연구하였다. 골프화를 구성하고 있는 인솔의 형상과 미드솔, 아웃솔을 고려하여 유한요소법으로 모델링하였다. 열전달을 위한 유한요소의 경계조건으로는 인간발의 표준적인 온도가 사용되었다. 열전달해석을 위해 상용프로그램으로는 MARC V7.3를 사용하였고 온도 및 인솔의 열전도량을 구했다. 본 연구에서 열전달의 특성에 따라서 유한요소법의 결과가 다르게 나온다는 결론을 얻었다. 본 연구 결과는 골프화 해석에 보다 나은 이해를 제공해준다. 더욱이, 본 연구결과는 골프화 관련 업체에서 활용할 경우 보다 효과적으로 설계하도록 도울 것이라고 믿는다.

**ABSTRACT** : This paper presents an analytic method and a design technique for golf shoes with coolant in the insole. The golf shoes are modeled using the finite element method for precision by considering the configuration of the insole, the midsole and the outsole, which compose the golf shoes. The values of standard human foot temperature for heat transfer boundary conditions are adopted for the FEA(Finite Element Analysis). By the commercial FEM software for heat transfer analysis, MARC V7.3, the temperature and the amounts of heat flux change for the insole are obtained, respectively. It can be concluded that results obtained by FEM in the insole are different depending on the characteristic of heat transfer. The results reported herein provide better understanding of analyzing the golf shoes. Moreover, it is believed that those properties of the results can be utilized in the shoes industry to develop the effective design method.

*Keywords* : FEM(Finite Element Method), Insole, Outsole and Midsole of Shoes, Golf Shoes, Heat Transfer Analysis

### I. 서 론

최근 골프에 대한 관심도의 증가로 국내의 골프 인구가 늘어남에 따라 값싸고 고기능의 골프화에 대한 소비자의 요구가 증가하고 있다. 그러나 국내

의 경우 골프 용품의 일종인 골프화는 대부분 외국의 유명제품을 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 현재 외국의 경우 미국, 일본 등의 유명브랜드의 신발 회사들은 고기능의 골프화 및 인솔(insole) 개발에 많은 연구 개발비를 투자하여 첨단 신소재를 이용한 고기능의 신발을 개발하고 있다.

현재 국내에서는 골프화를 구성하고 있는 인솔

<sup>†</sup>대표저자(e-mail : moonby@pusan.ac.kr)

(insole), 미드솔(midsole), 아웃솔(outsole) 등의 재질 선택 및 인체 공학에 바탕을 둔 구조 설계, 그리고 각각의 구성 단품을 이루는 소재의 배치 등에 대한 체계적인 해석 및 연구는 이루어지지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 골프화 제작과정의 문제점을 해결하기 위해 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 골프화의 설계와 이에 따른 해석 방법을 제안하고자 한다.

일반적으로 신발 하단부의 구조는 발의 바닥 부분과 직접 접촉하는 인솔과 지면이 직접 접촉을 하게 되는 아웃솔, 그리고 인솔과 아웃솔 사이에서 신발 착용자의 피로감 및 지면과의 접촉으로 인해 발생하는 하중을 완화시키는 역할을 하는 미드솔로 구성되어 있다.<sup>1</sup>

특히, 골프화 내부 구성요소 중 사람의 피로감이나 착용감에 직접적인 영향을 미치는 인솔개발에 대한 연구가 국내외에서 진행되고 있으며, 국외에서는 개별 상품화까지 진행되어 있다. 골프화는 필드에서 한 번 착용하게 되면 4~5시간 이상 지속적으로 착용한 상태를 유지하기 때문에 일반 신발 내부에서 많은 열이 발생하게 된다. 이러한 열이 골퍼에게 피로감과 불편감을 유발하여 집중력을 떨어뜨리게 된다. 따라서 일반 신발과는 달리 인솔의 고기능이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 발에 거부감을 최소화하면서 신발 내부에 발생하는 열을 인솔을 통하여 전달 할 수 있는 시스템을 설계하고자 한다. 즉, 인솔의 3차원 모델링을 통해 신발내부의 열전달 효과를 극대화시키기 위한 설계변경을 유한요소법을 이용한 열전달 해석을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 최적화하는 것이다. 또한 열전달 효과를 위해 성질이 다른 소재를 사용하여 배치함으로써 그 효과를 고려해보고 열전달 소재를 사용하지 않은 것과의 비교를 FEM해석 결과를 통해 예측하여 그 효과를 설계에 반영하고자 한다.

## II. 해석 방법

해석에 사용된 골프화 모델은 파이론(Phylon)재질과 실리콘(Silicon Elastomer)으로 이루어진 인솔

(insole)과 일반 탄성체인 고무보다 연성이 큰 파이론(Phylon) 재질을 가진 미드솔, 전형적인 복합 고무재질의 아웃솔(outsole)로 구성되어있다. 우선, 상용 해석 프로그램(MARC v7.3)을 실행하기에 앞서 해석에 사용될 3차원 유한요소(FEM) 형상을 모델링하고 각 부분의 구성재질에 관한 열전달 특성 파악을 선행하였다.

### 1. 유한요소 모델링

본 연구에서 해석되어진 인솔, 미드솔, 아웃솔 형상은 대체적으로 많은 곡면의 조합으로 구성되어 있어 유한요소형상으로 표현하는데 많은 어려움이 따른다. 따라서, 초기 3차원 콘트를 볼륨(control volume)은 전문 모델링 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 구현한 뒤, 유한요소 해석에서 사용될 FE(Finite Element)데이터를 구하는 방식을 이

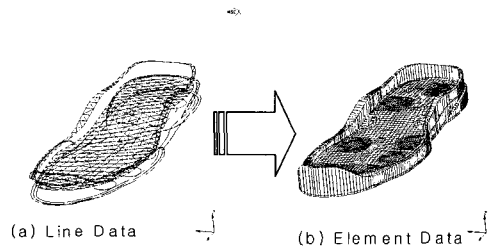


Figure 1. Modeling Data

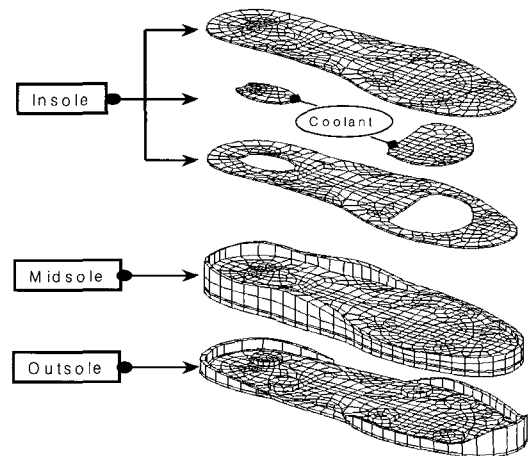


Figure 2. Modeling Golf Shoes

**Table 1. Mesh Generation Data**

	No. of Elements	No. of Node
Midsole	3028	2873
Outsole	864	1492
Insole	992	1554

**Table 2. Material Property**

(a) Midsole &amp; Insole [Phylon]

Temperature [°K]	293.15
Thermal conductivity [W/m.K]	0.33
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	960
Specific Heat [kJ/kg · K]	2.1

(b) Outsole [Rubber]

Temperature [°K]	293.15
Thermal conductivity [W/m.K]	0.157
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1170
Specific Heat [kJ/kg · K]	2.0

(c) Coolant [Silicon Elastomer]

Temperature [°K]	293.15
Thermal conductivity [W/m.K]	2.5
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2698
Specific Heat [kJ/kg · K]	0.703

용하였다. 즉, 우선적으로 Figure 1 (a)와 같이 선데이터(line data)를 이용하여 Figure 1 (b)의 요소데이터(element data)로 구성하였다. Figure 2는 해석에 사용되어진 각각의 유한요소 형상을 나타내고 있다. 해석에서는 8절점 3차원 입체 요소, 즉 육면체 요소를 사용하였고, 요소(element) 타입은 Full Integration 43을 사용하였다.<sup>2</sup> 그리고, 해석에 사용된 각각 형상의 요소 수와 절점의 수는 Table 1에 정리하였다. 또한 재료의 열전달 관련 물성치 데이터는 다음 Table 2 (a),(b),(c) 와 같이 정리하였다.<sup>3,4</sup>

### 1-1 열전달 방정식

본 연구에서는 냉각장치(coolant)가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 열전달 효과를 비교하

는 것이 주목적이다. 따라서, 골프화 내부에서 발과 인솔 그리고 내부공기의 유동에 따른 대류 열전달 해석을 고려하지 않았다. 또한 발의 체온에 의한 골프화의 열전도에 의한 온도 상승은 열전도 계수[k]의 온도에 대한 변화를 고려할 만큼 지배적이지 않다. 따라서, 2차원 정상상태의 전도 방정식을 사용하였고 열전도 계수의 값을 상수로 취급하여 해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 온도를 나타낸다.

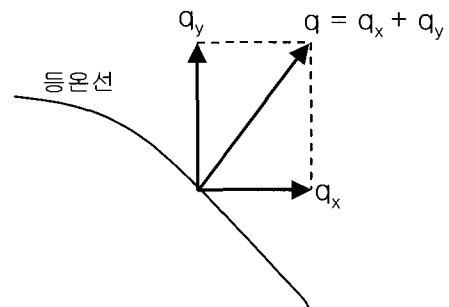
해석의 결과는 열흐름(heat flux)를 이용하여 그 에너지의 이동량을 통해 열전달의 효과를 평가 비교할 것이다.  $x$ 와  $y$  방향에서의 열흐름은 식 (2), (3) 과 같은 Fourier 방정식으로부터 계산될 수 있다.

$$q_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$q_y = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3)$$

$$q = q_x + q_y \quad (4)$$

단,  $k$ 는 열전도 계수이며  $A_x, A_y$ 는  $x, y$  방향에 대한 단면적을 나타낸다. 따라서 물체의 임의의 점에서의 총열흐름은 Figure 3에 나타난 것과 같이 등온선상의 임의의 한 점에서의  $q_x$ 와  $q_y$ 의 합으로 식(4)와 같이 구할 수 있다.

**Figure 3. Heat Flux for Two-Dimension**

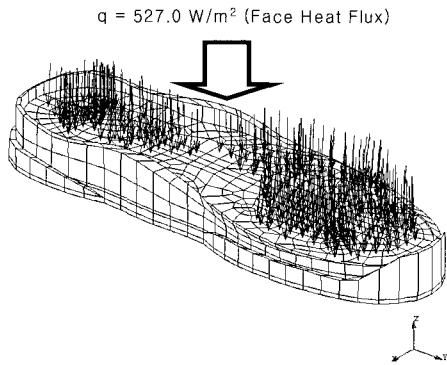


Figure 4. Boundary Condition

2. 유한요소 해석

해석용 상용프로그램을 실행하기에 위해서 우선적으로 모델링 되어진 형상 Figure 4 와 같이 전체적 절점에 대해서 초기 온도 20°(절대온도 294°K) 과 인솔 상부에 발에서 전달되는 열유속을 열전달 경계조건으로 부여하였다.

2-1 경계 조건

실제 미드솔과 아웃솔의 구성은 하나의 재질과 같이 거동될 수 있도록 서로 간의 접촉 조건이 완벽하게 이루어져 있다. 따라서, 해석시 완전히 접촉하여 접촉열저항을 고려하지 않을 수 있다고 가정한다. 인솔과 미드솔 그리고 아웃솔의 요소의 절점들이 서로 공유되어 해석에서 구해지는 값들의 연속성이 유지되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 모델링 및 해석을 수행하기 위하여 형상 모델링 및 요소생성(Mesh Generation) 단계부터 미드솔의 절점(Node) 및 요소(Element)들은 아웃솔의 상단부의 요소 및 절점들과 공유되어질 수 있도록 하였다.

발과 인솔이 접촉된 부분에서 열전도가 이루어지기 때문에 발에 의한 열전달은 압력 분포 형태와 동일하게 분포시켰다. 그리고 발에서 발산할 수 있는 최대의 에너지값을 복사열로 환산하여 부여하였다. 여기서 압력 분포 데이터는 한국 신발 피혁 연구소에서 보유하고 있는 일반인의 신발 착용시의 표준화된 압력 데이터를 적용하였다. 즉, 발의 사이즈는 260mm이고 몸무게 68kg의 몸무게를

가진 남자가 시속 5.4Km/h의 보통 속도로 보행시의 발에 작용하는 압력을 20회 측정하여 데이터를 평균치로 분석한 데이터를 사용하였다.

III. 해석 결과

냉각장치(coolant)를 인솔에 부착한 골프화 모델과 부착하지 않은 경우의 골프화 모델을 비교하여 해석이 수행되어졌다. 결과는 절점의 온도 분포와 열유속에 대하여 정리하였다. 단, 해석결과를 보여주는 그림들의 숫자들은 그림의 왼쪽에 나타난 수치들과 대응되어진다.

1. 냉각장치(coolant)의 유무에 따른 온도 분포 해석 결과

냉각장치가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대한 온도 분포의 해석 결과를 Figure 5, 6 에서 보여주고 있다. Figure에 보여지는 선들은 온도분포를 나타내고 있으며 앞부분과 뒷부분에 그려진 유선형의 라인은 냉각을 위한 장치가 부착된

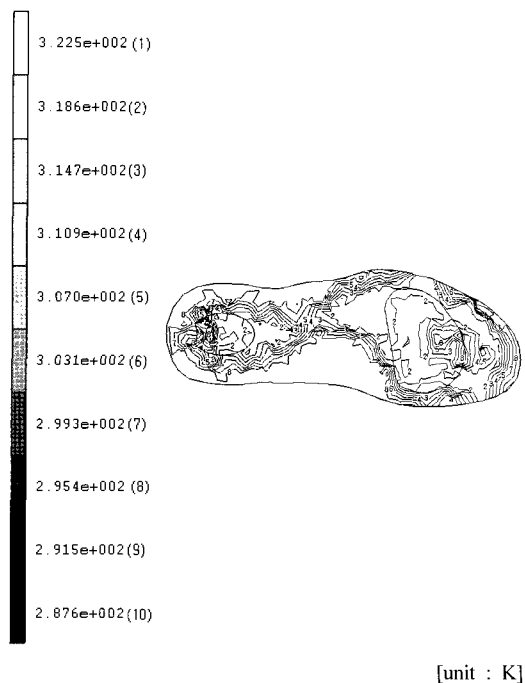


Figure 5. Distribution of Temperature with Coolant

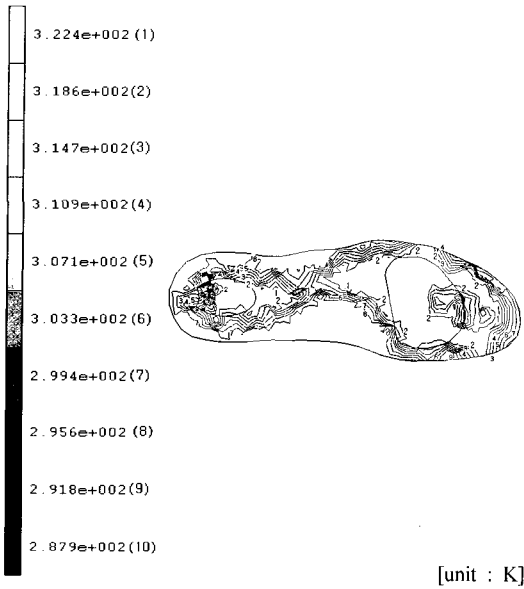
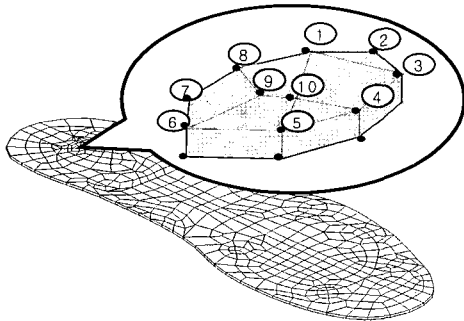
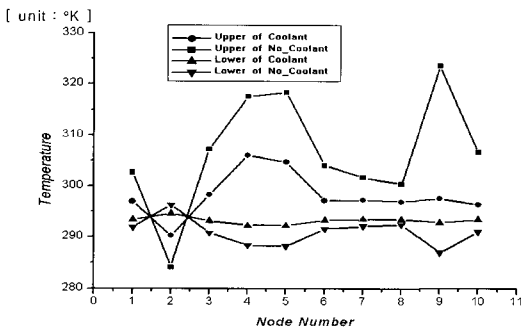


Figure 6. Distribution of Temperature without Coolant [unit : K]



(a) Node Number of Coolant Part



(b) Distribution of Temperature by Nodes

Figure 7. Temperature Distribution by Nodes

위치이다. 그 위치를 기준으로 냉각장치가 있는 경우 주위보다 낮은 온도 분포를 보임을 알 수 있다. 또한 실제로 냉각장치의 부분중 발바닥과 직접 접촉하는 부분에 대한 데이터를 인솔의 부분별 평균 온도를 Figure 7의 그래프 통해 비교해 볼 수 있다.

Figure 7 (b) 그래프에서 Upper에 해당하는 절점들은 1~10 이며 Lower는 그 절점의 하부 절점들을 의미한다. 그래프를 살펴보면 같은 절점 2 를 제외하고는 나머지 절점에서 모두 냉각 장치를 인솔에 부착한 골프화의 경우가 낮은 온도 분포를 보임을 알 수 있다. 발바닥과 직접 접촉하는 부분에 냉각장치를 부착한 것이 2°~3°정도 효과가 있음을 알 수 있다.

## 2. 냉각 장치(coolant)의 유무에 따른 열흐름 (heat flux)분포 해석 결과

골프화의 내부에서 발생하는 열을 잘 전달하기 위해서는 발과 접촉하는 인솔에서 에너지이동이 활발해야 한다. 따라서 그 에너지를 z 축 방향의 열흐름을 계산하여 비교 해석해 보았고, 그 해석 결과를 Figure 8 과 Figure 9 에 나타내고 있다.

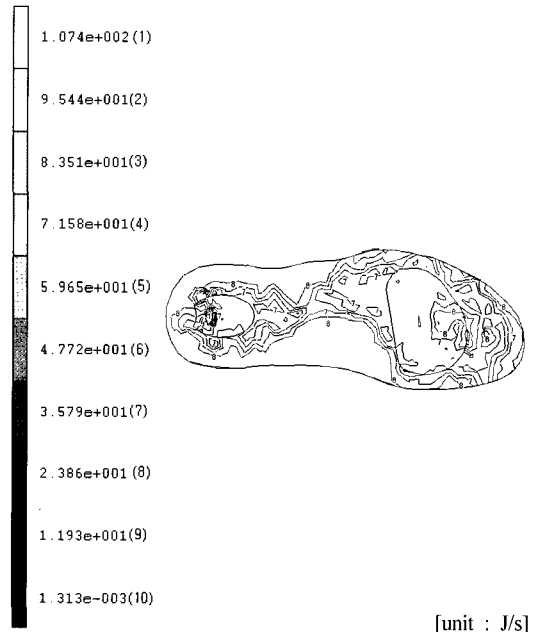


Figure 8. Heat Flux of z-direction with Coolant [unit : J/s]

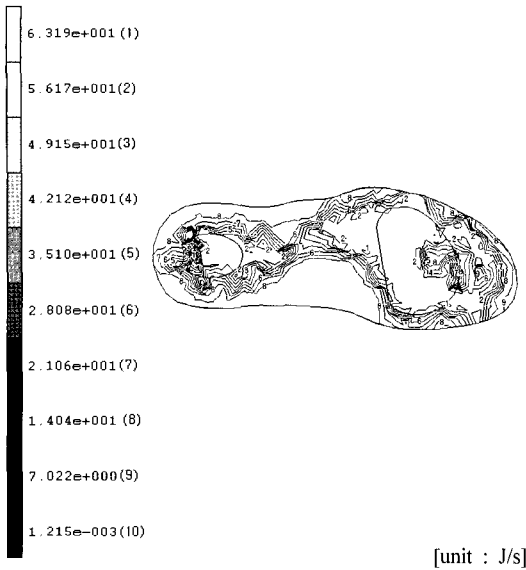


Figure 9. Heat Flux of z-direction without Coolant

Table 3. Heat Flux of xy-direction by Parts

		HF of xy Direction(J/s)		배율
		Coolant	No_Coolant	
part 1	Upper	412.1	155.2	2.66
	Lower	63.3	31.6	2.00
part 2	Upper	770.6	549.7	1.40
	Lower	285.9	123.7	2.31
part 3	Upper	300.3	131.7	2.28
	Lower	88.5	28.3	3.13
part 4	Upper	381.5	426.8	0.89
	Lower	204.8	115.7	1.77
part 5	Upper	204.8	115.7	1.77
	Lower	102.8	29.5	3.48
part 6	Upper	2285.6	2310.9	0.99
	Lower	653.1	503.4	1.30
Total	Upper	4354.9	3690.0	1.18
	Lower	1398.4	832.2	1.68
	SUM	5753.3	4522.2	1.27

해석결과를 살펴보면 냉각장치가 있는 경우에서 열흐름량이 대체적으로 많음을 알 수 있다. 그러나 어떤 부분에서는 냉각장치가 없는 경우 더 많은 열전달이 이루어지고 있다. 이것은 열전달을 돕기

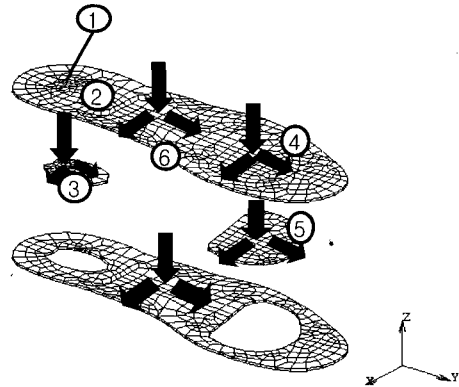


Figure 10. Direction of Heat Flux

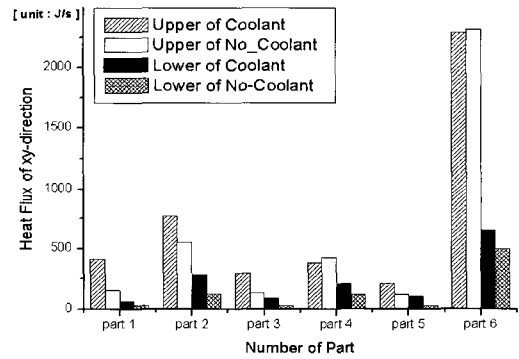


Figure 11. Heat Flux of xy-direction by Parts

위해 부착된 재료의 특성에 의해서 xy방향으로 열전달이 분산되어 흡수되기 때문이다. 따라서 그 결과를 부분별로 나누어서 비교 분석해 보면 Table 3 과 같은 데이터들을 얻을 수 있다. Figure 10는 부분별 번호와 열전도의 방향을 나타내고 있으며 그 방향은 xyz를 나타낸다. 인솔의 부분별 열흐름은 각각의 절점을 통해 흘러 들어가고 나가는 열전달량의 합을 기준으로 비교해 보았다. 그 비교 데이터는 Table 3에 보여주고 있다. Part 1에 유입되고 나가는 열전달량을 비교해 보면 2배에서 3배 정도의 차이가 나고 있다. 그리고 냉각을 위한 재료를 부착함으로써 같은 조건에서 약 27% 정도의 열전달 효과를 갖게 된다. 따라서 발과 직접 접촉하는 냉각장치의 면적을 넓힘으로써 좀더 많은 열량을 전달 할 수 있을 것이다. 그러나 서로 다른

재료로 만든 인솔이 직접 발에 접촉함으로써 두 재료에 대한 서로 다른 인장, 압축 등의 기계적 물성치의 차이로 인해 발에 불편함을 초래 할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 면적에 관한 연구는 아직 시도하지 않았다. 차후 지속적인 연구를 수행 할 계획이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 골프화의 열전달에 관한 해석과 설계에 관하여 제안하였다. 특히 신발의 착용 시간이 긴 골퍼에게 최상의 컨디션을 수행 할 수 있도록 골프화 내부의 열흐름에 주목하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 실제 골프화 내부의 온도 분포 형태를 파악하기 위해서 온도분포 해석을 수행하였다. 그 결과 열전달 효과를 높이기 위해 부착한 것이 일반적인 골프화의 인솔에 비하여 낮은 온도 분포를 보임을 알 수 있었다. 또한 이 해석결과에서 얻은 데이터를 이용하여 열전달 효과를 극대화하기 위한 냉각장치의 부착위치 선정에 이용할 수 있다.

둘째, 인솔에 냉각장치의 부착 유무에 따른 열흐름에 대한 해석 수행을 통하여 발과 직접 접촉하는 부분을 통해서 열전달이 활발하게 이루어짐을

알 수 있다.

이상과 같이 본 연구에서는 골프화에 열전달 해석을 통해 골프화의 기능성 향상에 기여함으로써 최적설계 및 설계기간을 단축하는데 기여할 수 있을 것이다.

#### 후 기

실험 및 관련데이터 제공에 협조해 주신 (주)마톡 관계자 여러분에게 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. D. Lemmon, T.Y. Shiang, A. Hashmi, J. S. Ulbrecht, and P.R. Cavanah, "The Effect of Insoles In Therapeutic Footwear-A Finite Element Approach", *Journal of Biomechanics*, **30**(6), 615 (1997).
2. MARC Vol. A User Information, MARC Analysis Research Corporation (1994).
3. J. P. Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill Korea, 8th Edition. 115 (2000).
4. K. Ranznjjevic, "Handbook of Thermodynamic Tables and Charts", Hemisphere Publishing Corporation. 3 (1976).