

# 면상발열체의 표면 열적조건이 발열체 내부온도에 미치는 영향

고동국\*, 정규진\*\*, 이병석\*\*\*, 김민수\*\*\*\*†  
 \*전북대학교 기계공학과, \*\* (주) 덴탈비전, \*\*\* 전북대학교 토목공학과,  
 \*\*\*\*† 전북대학교 기계설계공학과  
 e-mail: kimms@jbnu.ac.kr

## Effect of surface thermal conditions of surface heating element on the internal temperature of heater

Dong-Guk Ko\*, Kyu-Jin Jung\*\*, Byung-Suk Lee\*\*\*, Min-Soo Kim\*\*\*\*†  
 \*Dept. of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University  
 \*\*Research&Development Center of Dentalvision co., Ltd.  
 \*\*\*Dept. of Civil Engineering, Jeonbuk National University  
 \*\*\*\*†Devi. of Mechanical Design Engineering, Jeonbuk National University

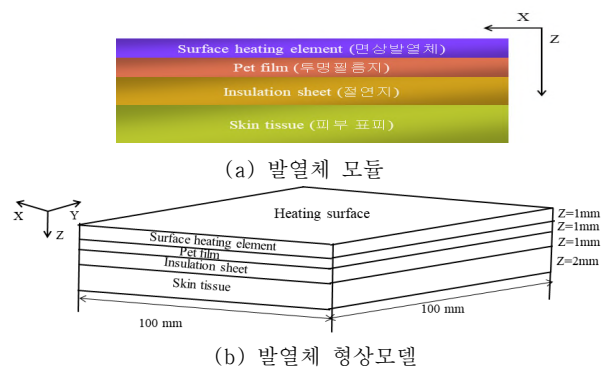
### 요약

본 연구는 면상발열체의 표면에 일정한 열유속과 열유속 시간을 가했을 경우 발열체의 내부온도 특성을 해석적 방법을 이용하여 분석한 것이다. 발열체 모듈의 가로, 세로 크기는 각각 100 mm이고 높이는 5 mm이다. 열유속은 10,000 W/m<sup>2</sup>, 15,000 W/m<sup>2</sup>, 20,000 W/m<sup>2</sup>이며 열유속 시간은 5초, 10초, 15초, 20초, 30초, 50초이다. 열유속 시간이 50초일 경우 발열체의 온도는 120.5°C까지 상승한 반면 피부 표면온도는 1.7°C 상승하였다. 결과적으로 발열체의 표면온도는 수평방향으로 크게 상승한 반면 깊이방향으로는 낮게 상승하였다. 이는 발열체의 열전도가 X-Y평면 방향으로 전달되며 발열체 하부의 투명 필름지와 절연지의 열전도율이 매우 낮기 때문이다. 피부의 피부온도는 발열체의 열유속이 20,000 W/m<sup>2</sup>일 경우 10,000 W/m<sup>2</sup>, 15,000 W/m<sup>2</sup>와 비교했을 때 최대 0.82°C 상승하여 가장 효과적이다.

### 1. 서론

대형병원을 비롯한 관절 전문 병원에서는 무릎 고관절 골절과 십자인대 파열로 인한 인공관절 치환 수술 및 시술환자가 급격하게 증가하고 있다. 이로 인해 무릎관절 수술환자의 재활치료를 목적으로 CPM(Continuous Passive Motion) 기기가 널리 보급되어 있다. 그러나 CPM 기기는 수술 후 재활하는 하체의 근육 운동량과 반대 쪽 하체의 근육 운동량 차이로 인해 하체 근력의 균형을 맞추기 위한 추가적인 재활 치료가 요구된다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위해 전기 근육자극(EMS(Electric Muscle Stimulation)) 장치와 온열 치료기기 등 여러 의료장비가 사용되고 있다. 특히 온열 치료 기기는 바이오 산업 발전과 더불어 융복합 기술을 이끌고 있으며 그 중 하나가 발열체 기술이다. 발열체는 높은 전기전도성과 고효율의 발열특성을 응용한 기술로서 선상발열체와 면상발열체로 구분된다. 선상발열체는 선형 상태인 니켈 또는 철 크롬선에서 전기저항에 의해 열이 발산하는 반면 면상발열체는 면 전체에서 복사열이 방출하는 구조이며 열저항에 대한 안정성을 확보할 수 있다.[1] 따라서 본 연구에서는 면상발열체의 표면에 일정한 열유속과 열유속 시간을 가했을 경

우 발열체 내부를 통한 무릎관절 수술환자의 피부 온열치료를



[그림 1] 발열체 모듈 및 형상모델

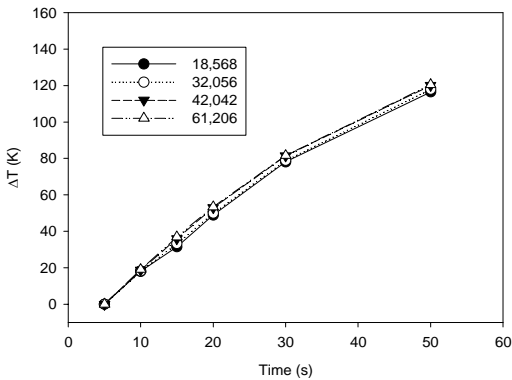
위한 기초자료를 수집하고자 수치해석적 연구를 수행하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 발열체의 모듈과 형상모델을 나타낸 것이며 가로와 세로의 크기는 각각 100 mm이고 높이는 5 mm이다. 윗면으로부터 Z=0~1 mm는 면상발열체이고 1~2 mm 그리고 2~3 mm는 각각 투명 필름지와 절연지로서 외부 열원

으로부터 피부조직을 보호한다. Z=3~5mm는 피부조직의 표피층에 해당되며 면상발열체 표면의 열은 발열체 하부면에 전달된다.

표 1은 해석모델 소재에 대한 각각의 열적 물성치를 나타

[표 1] 해석모델 각 소재의 열적 물성치[2-4]

Materials	Density ( $\rho_m$ ; kg/m <sup>3</sup> )	Thermal conductivity ( $k_m$ ; W/m·K)	Specific heat ( $C_m$ ; J/Kg·K)
Surface heating element	2,200	39	1,100
Pet film	1,390	0.29	4.91
Insulation sheet	70	0.026	1,045
Skin tissue	1,200	0.25	3,600



[그림 3] 면상발열체 열유속이 10,000 W/m<sup>2</sup>일 경우 격자수에 따른 격자의존성 평가

낸 것이다.[2-4] 투명 필름지의 경우 열전도율이 낮아 면상발열체로부터 전달된 열은 급격하게 낮아지며 절연지는 필름지의 온도를 피부조직에 일정한 상태로 전달한다.

### 2. 수치해석

면상발열체의 열전달을 해석하기 위한 열전도 방정식은 아래와 같다.[2]

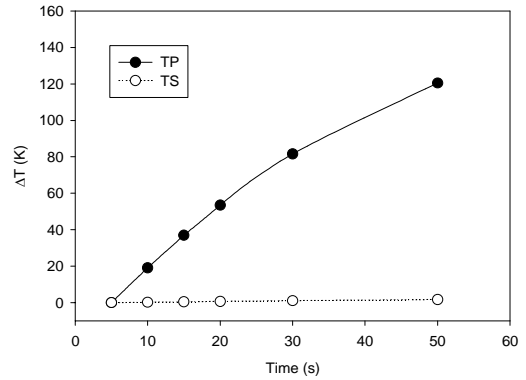
$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \nabla \cdot (k_m \nabla T_m) + Q_p \quad (1)$$

여기서  $\rho_m$ ,  $c_m$ ,  $k_m$ 는 소재(material)의 밀도와 비열 그리고 열전도도를 나타낸 것이며 각각 표 1을 참조하였다.  $Q_p$ 는 면상발열체 표면에서의 열유속 값이며 solution method는 비정상상태를 고려하여 PISO algorithm을 이용하였다. 열전도 방정식 (1)을 풀기 위해서는 ANSYS-FLUENT 16.0 상용 열유동해석 프로그램을 사용하였다.[4]

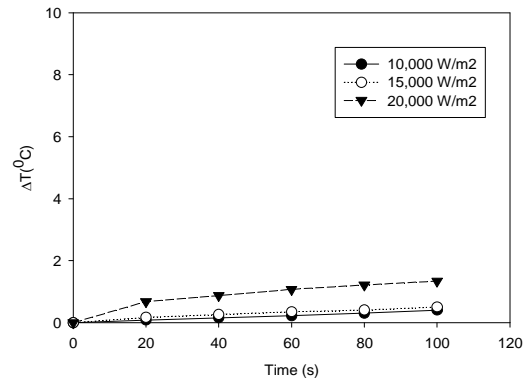
### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 면상발열체의 열유속이 10,000W/m<sup>2</sup>일 경우 격자수에 따른 격자의존성을 나타낸 것이다. 격자의존성 평가는

대류 열전달계수에 의해 온도변화가 가장 크게 발생하는 위치(0, 0, 0)에서 수행하였다. 시간변화에 따른 해석결과와 차이는 격자수에 따라 최대 2.3%의 오차율내에서 유사한 경향을 보였다. 수렴시간은 발열체 모듈 형상이 대체적으로 단순하여 최대 17분 정도로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 수렴



[그림 4] 면상발열체 열유속이 10,000 W/m<sup>2</sup>일 경우 열유속 시간에 따른 발열체의 표면온도와 피부 표피온도 변화량



[그림 5] 면상발열체 열유속 변화에 따른 피부 표피온도 변화량

성의 안정성과 해의 정확성 등을 고려하여 61,206개의 정렬격자를 사용하였다.

그림 4는 면상발열체의 열유속이 10,000W/m<sup>2</sup>일 경우 열유속 시간에 따른 발열체의 표면온도와 피부 표피온도 변화량을 나타낸 것이다. 열유속 시간이 50초까지 증가할수록 발열체의 온도는 120.5℃ 크게 상승한 반면 피부조직의 온도는 1.7℃ 증가하였다. 이는 발열체의 열전도 방향이 X-Y평면 방향으로 전달되고 발열체와 피부조직 사이에 열전도율이 낮은 투명 필름지와 절연지가 존재하여 하부에 열이 전달되지 않기 때문이다.

그림 5는 면상발열체 열유속 변화에 따른 피부 표피온도 변화량을 나타낸 것이다. 면상발열체의 열유속이 20,000W/m<sup>2</sup>일 경우 10,000W/m<sup>2</sup>, 15,000W/m<sup>2</sup>와 비교했을 때 피부 표피온도는 최대 0.82℃ 상승하여 가장 효과적이었다. 또한 열유속이 20,000W/m<sup>2</sup>일 경우 열유속 시간이 20초까지 온도상승이 상대적으로 높게 증가한 반면 그 이후에는 선형적으로 서

서히 상승하였다. 따라서 열유속과 열유속 시간이 각각  $20,000\text{W/m}^2$ 와 20초 이내일 경우 면상발열체에 의한 피부조직의 온도상승은 높게 나타났으며 발열체에 의한 온열 치료 효과 또한 증가할 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 과제는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력선도대학(LINC+) 육성사업(과제 번호: 2020-C-G028-010112)의 연구결과입니다.

#### 참고문헌

- [1] 고영웅, 강영식, 정용식, “탄소계 면상발열체 발열 특성 연구”, 한국염색가공학회지, 제 32권, 제 1호, pp. 65-71, 2020년.
- [2] 고동국, 임익태, “광조사에 따른 온도분포를 이용한 생체 조직내 비정상조직 탐지에 대한 연구”, 대한기계학회지, 제 41권, 제 5호, pp. 303-309, 2017.
- [3] Incropera, F. P and Dewitt, D. P, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Fourth Edition, John Wiley & Sons, 2008.
- [4] ANSYS Co., ANSYS Fluent User’s Guide 16.0.