

미세혈관 문합 후 순환계 질환 개선을 위한 원적외선 치료기의 열적 특성 평가

양영규* · 오승현* · 김철웅**

*(주)트리플씨메디칼

Evaluation of Thermal Properties for the Far Infrared Therapy After Microvascular Anastomosis for the Treatment of Circulatory Diseases

Young-Kyu Yang*, Seung-Hyun Oh* and Cheol-Woong Kim**

* R&D Center, Triple-C Medical Corp.

(Received November 13, 2013 ; Revised December 21, 2013 ; Accepted December 22, 2013)

Key Words: Microvascular Anastomosis(미세혈관문합), Far Infrared Therapy(원적외선 치료기), Heat Equation(열방정식), Thermal Time Constant(열시상수), Thermal Conductivity(열전도율), Volumetric Heat Capacity(체적열용량)

초록: 혈액순환촉진, 심혈관계치료, 피부질환, 암세포억제 등의 의료분야에 원적외선 치료법이 광범위하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 원적외선 치료에 효과적인 패널형 방사체의 발열부에 대한 열적 특성을 실험적으로 분석하였다. 발열선은 정상상태에서 절연피복에 150 mW/m²의 열유속으로 열에너지를 공급하여 절연피복은 발열선 온도의 20%에 도달하였다. 단열막 사용은 약 20%의 발열판 표면온도 증가효과가 있었으며 열시상수를 상승시켜 혈액순환촉진에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 발열선의 배치간격이 발열부 설계에 중요한 인자이며 열확산의 중첩을 위해 발열판의 열전도계수와 밀도를 고려해야함을 알 수 있었다.

Abstract: Far-infrared radiation therapies are becoming more popular for blood circulation disorders, cardiovascular disease, skin diseases, inhibit cancer cell, etc replacing conventional operations. In this research, thermal characteristics of heating part in panel radiators, which is effective on the blood circulation disorders were experimentally analyzed. The heating line supplies heat energy to insulation coatings with heat flux of 150 mW/m² in normal status and as a result the coatings reached 20% of the heating line temperature. In other words, the insulation itself could increase surface temperature of heating plates by 20% and raise thermal time constant promote blood circulation effect. We also found that space arrangement of the heating lines was an important factor in designing heating parts and both coefficient of heat conduction and density of the heating plate should be also considered for superimpose of thermal diffusion.

- 기호설명 -

q	: 열유속(W/m ²)	c_p	: 비열 (J/kg·K)
q'	: 매질의 단위체적당 발생에너지 (W/m ³)	T_{amb}	: 상온 (°C)
k	: 열전도율(thermal conductivity (W/m·K))	T_{std}	: 정상상태 온도 (°C)
ρ	: 밀도 (kg/m ³)	τ	: 열시상수(sec)

1. 서론

최근 혈액순환촉진, 심혈관계 질환치료, 피부질환, 암세포억제 등의 의료분야에 원적외선 치료법이 광범위하게 활용되고 있다.⁽¹⁻⁸⁾ 간단한 치료법으로는 건열 혹은 습열을 적용하여 부분적인 감염, 근육이완, 통증완화, 순환증진을 위해 적용된다.⁽⁹⁾ 이와 같이 의료분야에 광범위하게 적용되고 있는 원적외선은 가시광선보다 긴

† Corresponding Author, woong25@korea.ac.kr

과장으로 열작용을 가지는 복사선을 말하며 이 중 파장이 8~14 μm 인 원적외선은 인체에 조사할 경우 열에너지에 의해 피하조직까지 온도가 상승하여 모세혈관이 확장되고 혈액순환이 활성화되면서 신진대사의 촉진, 통증완화, 자율신경계의 균형 촉진 등의 생리적 효과를 가지게 된다. 원적외선의 핵심요소인 방사체를 가열하기 위해서는 주로 니크롬 재료의 열선을 사용한다. 통전으로 발열된 열선의 열에너지가 방사체에 전달되면 방사체표면에서 원적외선이 방사되는 원리이다. 따라서 발열체의 재료와 종류에 적합한 열선을 효과적으로 배치해야 열효율이 높은 원적외선 치료기를 제작할 수 있다. 인체 전신을 일시에 조사할 수 있는 대용량 원적외선 치료기의 방사체는 패널형이 적합하다. 방사면의 균일한 온도분포, 표면적의 극대화, 방사량 증가 등의 측면에서 매우 효율적이기 때문이다.⁽¹⁰⁻¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 원적외선 방사체 제작의 초기단계에서 면상발열체의 발열부를 구성하는 발열판, 열선, 단열재 간의 설계조건에 따른 열전달 특성을 평가하였다. 방사면의 균일한 온도분포는 열선의 온도뿐만 아니라 열선의 배치, 단열재와 발열판의 재료특성에 의존하고 있다. 또한 니크롬선 등의 발열선은 단락방지를 위해 발열선의 표면에 충분한 두께의 전기부도체로 완전절연되기 때문에 열전도특성이 낮아져 발열효율이 저하되고, 그로 인해 발열선의 국부영역만 발열되는 구조로 인해 온도분포가 불균일한 경향이 있다. 그러므로 본 연구를 통해 발열부의 각 구성요소들의 온도특성을 고찰하고 구성요소간 열전달을 지배하는 인자를 도출하였다. 특히 재료특성과의 상호관계를 규명하기 위해 원적외선 치료기의 방사체를 제작한 후 원적외선 치료기 발열선 절연피복의 온도특성을 분석하고 해당 온도데이터를 상세히 분석하였다. 또한 원적외선 치료기 발열판의 단열재 여부에 따른 표면온도특성을 평가하고 향후 원적외선 치료기에 적합한 모델을 예측하였다.

2. 원적외선 치료기의 방사체 제작 및 실험방법

본 연구에서 개발한 선상발열기반 원적외선 치료기의 사양을 Table 1에 제시하였다. 방사체는 850×850cm² 크기의 발열판과 단열재가 맞물려 있는 구조이다. 열원인 발열선은 절연을 위해 두께 2mm의 실리콘 외피로 피복하였고 발열판 뒷면에 80mm간격 10줄로 배치하였다. 온도조절기는 220V 사용전압 하에 작동되며 발열판에 최대 50°C의 온도를 인가하도록 설계하였다. 온도측정은 온도기록장치(thermometer datalogger, EXTECH Instrument, EasyViewTM, EA15)를 사용하였으며 매초마다 저장된 온도데이터는 OriginPro8로 처리하여 그래프화하였다. 온도측정실험은 아래와 같이 네 가지 경우로 구분하여 수행되었다. ① 발열선 표면온도 측정, ② 실리콘 표면온도 측정, ③ 단열재가 없는 경우 발열판 표면온도 측정, ④ 단열재가 있는 경우 발열판 표면온도 측정. 상기 모든 경우에 대하여 통전 전후 시변 온도측정을 수행하였으며 통전시간은 실험의 종류에 따라 상이하게 설정하였다. 발열선과 실리콘 표면온도측정은 단열재를 제거한 후 발열선상 임의의 지점에 온도센서를 부착하여 수행하였다. 발열판의 온도측정을 위해서는 발열판 중앙부에 Fig. 1(a)와 같은 20×20cm²의 메쉬를 작도하였다. 메쉬의 각 행과 열에 번호를 부여하고 행과 열의 교차점을 온도측정 위치로 정하였을 때 각 점의 온도는 $T(i, j)$ ($i=0\sim 20, j=0\sim 20$)로 나타낼 수 있다. 온도 측정은 행 방향 후 열 방향으로 3초 간격으로 $T(0,0)$ 에서부터 $T(21,21)$ 까지 순서적으로 수행되었다.

Table 1 Specification of far infrared radiation heater

contents	specifications
size	850cm × 850cm 120W
heating plate	corrosion resistance galvalume ($t=0.5\text{mm}$)
heating wire	silicon clothes
heat insulating material	hard polyurethane
surface temp.	20~50 °C
stabilizer	thermo-controller and over prevent for temp.
wiring circuit	series parallel
voltage	220V

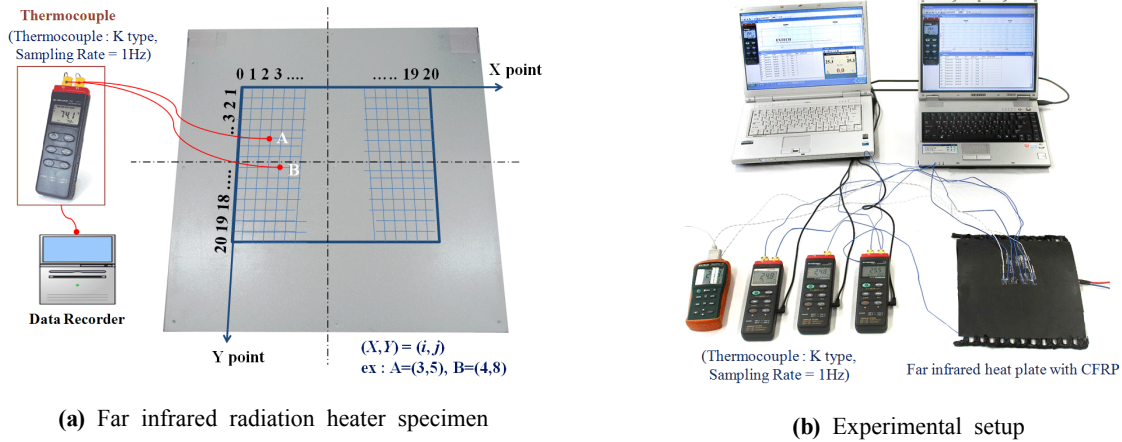


Fig. 1 Mesh for the measurement of temperature for heater specimen and experimental electro-based equipment

3. 실험결과 및 분석

3.1 원적외선 치료기 발열선 절연피복의 온도특성

방사체의 과도온도특성은 발열선, 발열선 피복, 단열재, 발열관의 4개 구성요소간의 과도열전달에 의해 결정된다. 따라서 몇 개의 경계조건을 이용하여 열확산방정식의 해를 구하는 해석적 방법보다는 유한차분법에 의해 해를 구하는 방법이 적절하다. 그러나 본 연구는 열확산 방정식의 정확한 해를 구하는 것이 목적이 아니므로 열원으로부터 발생한 열에너지를 각 구성요소에 신속하게 전달하여 균일한 온도분포를 갖는 발열관의 제조에 필요한 파라미터를 구하는 것으로 연구목적을 설정하였다. 이를 위하여 각 구성요소의 과도온도특성을 직접 측정하고 측정데이터를 모델링해서 해를 구한 후 구성요소간의 열전달을 지배하는 실험적 파라미터를 도출하는 방법을 택하였다. 또한 열확산 방정식을 이용하여 도출된 파라미터의 물리적 의미를 고찰하였다. 과도열전도 문제는 아래의 열확산방정식에 의해 기술된다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{q'}{k} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)에서 r =반지름방향, q' =매질의 단위체적당 발생에너지(W/m^3), k =열전도율(thermal conductivity, $(W/m \cdot K)$), T =온도, ρ =밀도, c_p =비열이다. 발열선과 실리콘 피복에는 무한원통좌표계(r, ϕ, z)를 적용하였다. 발열선 내의 온도분포는 균일하고 발열선의 반지름이 실리콘 피복의 두께에 비해 매우 작은 경우에 식 (1)은 피복의 과도온도특성을 기술하는 방정식이 된다. ϕ 축, z 축에 대한 온도구배는 없는 것으로 가정하면 식 (1)은 식 (2)처럼 간략해질 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q'}{k} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

또한 발열선 외에 실리콘피복을 통한 과도열전달의 기술은 $q' = 0$ 이라고 할 수 있으므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

식 (3)의 해를 구하기 위해서는 계수 ρ, c_p, k 와 경계조건이 필요하다. 그러나 상기 해석적 방법보다는 열원인 발열선과 실리콘 외피의 표면온도에 대한 과도특성을 측정함으로써 얻어진 데이터의 모델링을 통하여 해를

구하고 식 (3)의 계수와 경계조건을 역으로 구하는 방법을 택하였다.

3.2 원적외선 치료기의 발열선과 절연피복의 온도데이터 분석

발열선과 실리콘피복의 온도상승 및 하강 특성 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 발열선은 약 1분 경과 후 정상 상태 온도 $63\pm 1^\circ\text{C}$ 에 도달한 반면 발열선을 둘러싼 실리콘 피복의 정상상태온도는 $51\pm 0.5^\circ\text{C}$ 였다. 실리콘피복의 온도는 열원인 발열선에서 전도된 열에너지 공급에 의해 발생한다. 식 (4)에 기술된 푸리에법칙에 의하면 전달된 열에너지는 온도구배의 크기에 비례한다.

$$q = k \frac{\partial T}{\partial r} \tag{4}$$

여기서 k =열전도율(W/m·K), q =열유속(W/m²)이다. 실리콘피복의 두께를 L 이라고 하면 식 (4)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{k}{L}(T_w - T_s) = q \tag{5}$$

여기서 T_w 는 발열선 표면온도, T_s 는 피복표면온도이다. 식 (5)의 $T_w - T_s$ 는 발열선에서 피복으로의 시변열유속을 정량적으로 표현한 것으로 Fig. 2에 도시된 그래프와 같다. 즉 열유속은 통전직후 급격히 증가하다가

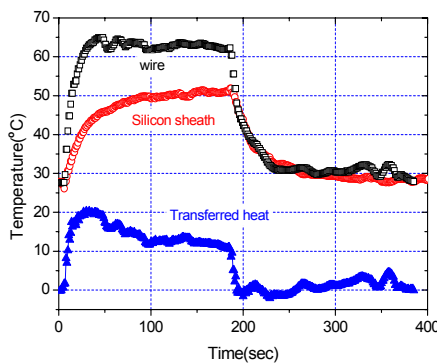


Fig. 2 Thermal characteristics of heating wire and silicon sheath with transferred heat curve

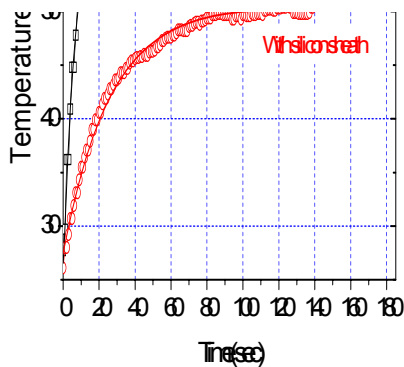


Fig. 3 Heating curve of the wire and the silicon sheath of relationship between temp. vs. time

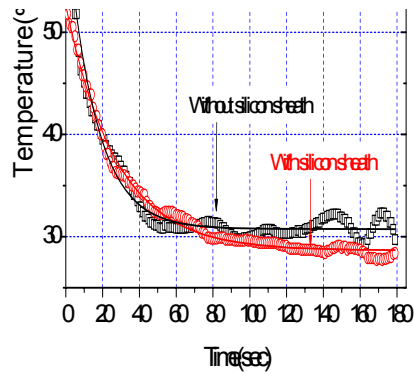


Fig. 4 Relationship between temperature and time in case of the cooling curve

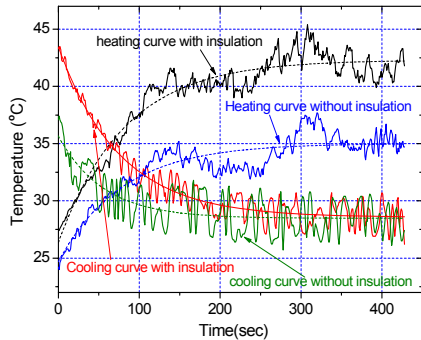


Fig. 5 Relationship between temperature versus time of heating panel in heating and cooling cycle

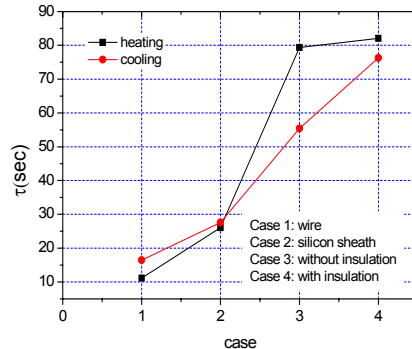


Fig. 6 Four difference cases on thermal time constant i.e. wire, silicon sheath, with and without insulation

정상상태에서 일정하게 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 실리콘 피복의 열전도율(k)=28-30W/m°C, 실리콘 피복의 두께(L)=2.0mm일 때 정상상태의 열유속은 150mW/m²이다. 그러므로 발열선은 정상상태의 절연피복에 150mW/m²의 열유속으로 열에너지를 공급하며 절연피복의 정상상태 온도는 발열선 정상상태 온도의 20%에 도달하는 것을 알 수 있다. 식 (3)의 해 $T(r=L, t)$ 에 대한 실험데이터를 고찰하기 위하여 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 온도상승 및 하강곡선을 분리하여 나타내었다. Fig. 3 및 Fig. 4의 실선은 데이터 피팅곡선이며 아래와 같은 식 (6)으로 모델링하였다.

$$T(t) = C_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + C_3 \tag{6}$$

식 (6)에서 통전이전의 실험실 온도는 $T(t=0)$, 정상상태 온도는 $T(t=\infty)$ 로 표현될 수 있다. 이 경계조건들을 식 (6)에 대입하면 $T(t=\infty) = T_{std} = C_3$, $T(t=0) = T_{amb} = C_1 + T_{std}$ 임을 알 수 있으므로 식 (6)은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$T(t) = (T_{amb} - T_{st})e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{st} \tag{7}$$

식 (7)에 의하면 승온속도는 파라미터 τ 에 의해 결정되므로 τ 를 열시상수로 정의할 수 있다. 즉 $t = \tau$ 일 때 재질의 온도는 정상상태의 63%이다. 실험에 의하면 온도상승시 발열선의 열시상수(τ)=11.2초, 실리콘 피복의 열시상수(τ)=26초이므로 피복의 열시상수(τ)가 14.8초 느리다. 온도하강 시에는 발열선의 열시상수(τ)=16.5초, 실리콘피복의 열시상수(τ)=26초로 9.5초의 차이를 나타냈다. 식 (3)으로부터 열시상수(τ)는 $k/\rho c_p$ 이다. 그러므로 절연 피복의 승온속도는 피복의 밀도(ρ), 비열(c_p)과 열전도계수에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 또한 열시상수(τ)가 가열과 냉각에 따라 다르게 나타나는 이유도 밀도(ρ) 값이 온도에 따라 달라지기 때문인 것으로 이해할 수 있다.

3.3 원적외선 치료기 발열판의 표면온도특성

Fig. 5는 발열판의 과도온도특성을 나타낸 것으로 단열재를 사용한 발열판은 단열재를 사용하지 않은 발열판에 비해 정상상태에서 표면온도가 약 20% 높다는 사실을 파악할 수 있었다. 또한 Fig. 6으로부터 단열재의 영향을 열시상수(τ)의 관점에서 파악할 수 있었다. 온도상승의 경우, 단열재 열시상수(τ)=82초, 비단열재 열시상수(τ)=79.4초로 나타나 단열재 사용여부가 승온속도에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 온도하강의 경우, 단열재 열시상수(τ)=76초와 비단열재 열시상수(τ)=55.4초로 약 20.1초의 차이가 있었다. 그러므로 단열재의 사용이 통전 중단 시에도 발열판의 냉각속도를 저해하는 보온효과로 작용하는 것을 알 수 있다. 발열부의 구성요소를 열시상수의 관점에서 나타낸 Fig. 6과 같이 발열선과 단열재를 사용한 발열판의 열시상

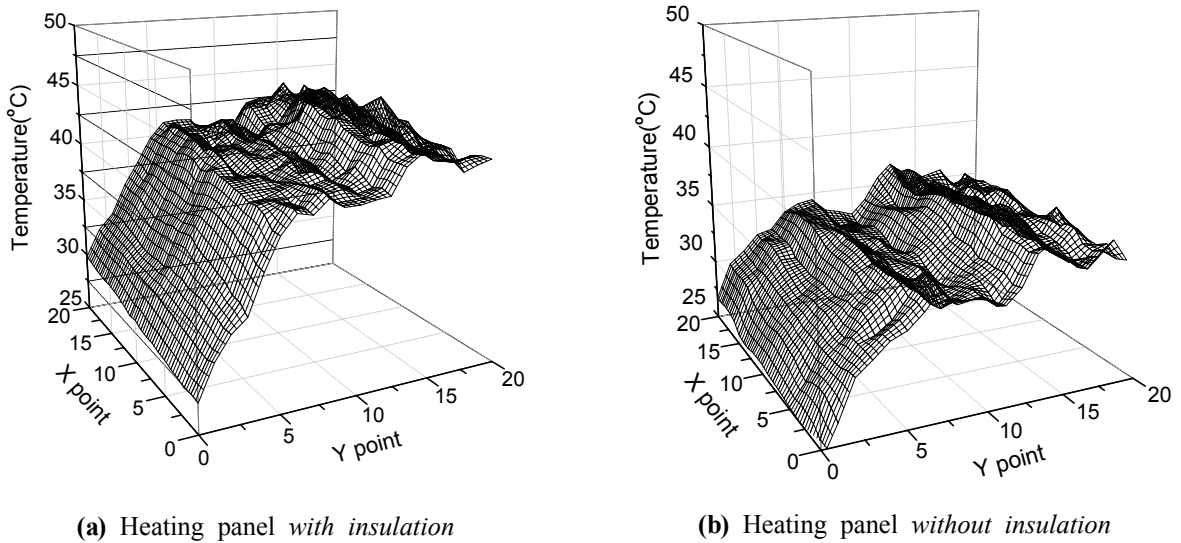


Fig. 7 Time evolution of the surface temperature during heating for heating panel with and without insulation

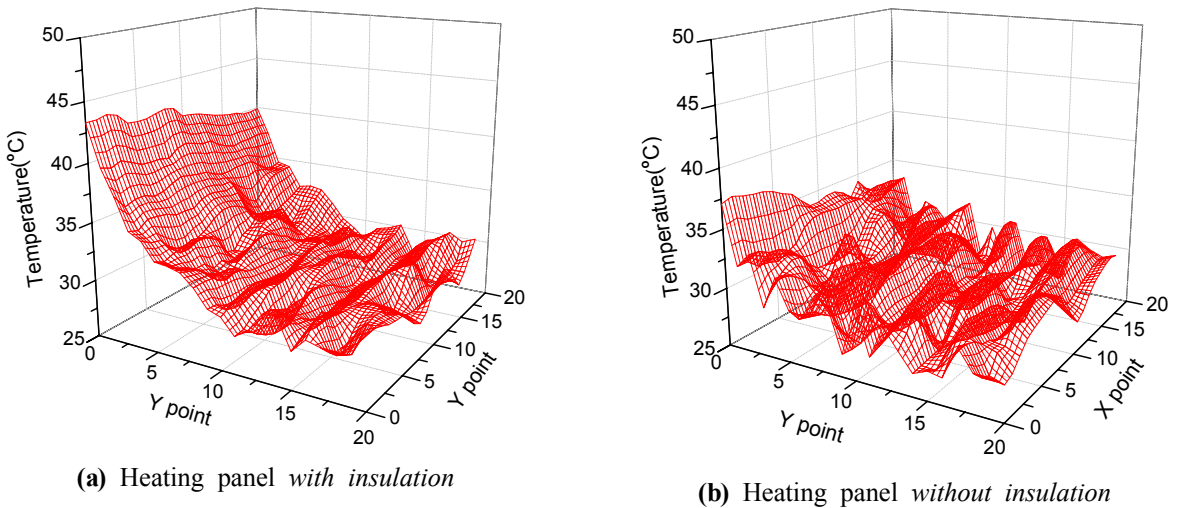


Fig. 8 Time evolution of the surface temperature during heating for cooling for heating panel with and without insulation

수는 가열 시 약 71초, 냉각 시 약 60초의 차이를 나타내며 열전달속도를 감소시키는 결과가 도출되었다. 이 차이는 발열선의 열시상수 보다 약 7배 큰 값이다. 식 (3)에서 발열관의 밀도(ρ)와 비열(c_p)의 곱은 체적열용량(volumetric heat capacity)으로 정의한다. 발열부 설계에 각 구성요소의 체적열용량이 큰 재질을 사용하면 열전달 효율을 높일 수 있다. 또한 열전도율이 낮은 단열재를 사용하여 통전 중단시 보온효과를 증대하도록 설계할 수 있을 것이다. Fig. 7 및 Fig. 8은 단열재의 유무에 따른 발열관 표면온도 거동을 나타낸 그래프이다. 각 $T(i, j)$ 는 3초 간격으로 측정되었으므로 표면온도의 과도특성과 정상상태의 온도분포를 동시에 볼 수 있는 장점이 있다. Fig. 7 및 Fig. 8의 상승곡선을 대략 살펴보면 처음에는 급격한 경사를 갖는 온도거동이 나타나고 발열관 표면이 정상상태에 도달하면서 완만한 경사의 온도분포가 관찰된다. 특히 발열선이 위치한 $(X, Y) = (i, 6)$ 과 $(i, 15)$ 지점에서는 발열관의 온도가 최대이다. 이는 발열선의 배치간격이 넓게 설정되어 $(X, Y) = (i, 6)$ 과 $(i, 15)$ 지점으로부터의 열확산 분포가 중첩되지 않기 때문이다. 그러므로 균일한 온도분포를 갖는 발열관 설계에는 발열관의 열전도계수를 고려하여 발열선의 배치를 설정하는 것이 중요한 것임을 알 수 있다. 온도하강곡선의 경우 단열재를 사용한 Fig. 8(a)에 비해 단열재를 사용하지 않은 Fig. 8(b)에서 비균일

한 온도분포를 관찰할 수 있다. 이는 단열재로 인해 차단되었던 대류의 영향을 받기 때문이다. 따라서 단열재는 통전 중단시에도 온도분포를 균일하게 유지해 주는 역할을 한다는 것도 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 각종 의료분야에서 널리 활용되는 원적외선 치료기의 패널형 방사체의 발열부에 대한 열적 특성을 실험적으로 분석하였다. 그리고 다음과 같은 기술적 결론을 유도할 수 있었다.

(1) 각 구성요소간 열전달은 열시상수(τ)에 의해 결정되었다. 그 결과 발열선은 정상상태에서 절연피복에 150 mW/m^2 의 열유속으로 열에너지를 공급하며 절연피복은 발열선 온도의 20%에 도달하는 것으로 나타났다.

(2) 단열재 사용은 약 20%의 발열관 표면온도 증가효과가 있었으며 열시상수를 상승시켜 통전중단 시에도 보온효과에 기여하는 것으로 나타났다.

(3) 발열선의 배치간격이 발열부 설계에 중요한 인자임을 알 수 있었고 열확산의 중첩을 위해 발열관의 열전도계수와 밀도를 고려해야함을 알 수 있었다. 이상과 같은 기술적 결론을 바탕으로 의료용 원적외선 치료기의 개선을 추진할 수 있었다.

후 기

본 연구는 보건복지부 보건의료연구개발사업(미래융합의료기기개발사업)의 지원에 의하여 이루어진 것임.
(과제고유번호 : A092140)

참고문헌

- (1) Lai, C.-C., Fang, H.-C., Mar, G.-Y., Liou, J.-C., Tseng, C.-J. and Liu, C.-P., 2013, "Post-angioplasty Far Infrared Radiation Therapy Improves 1-Year Angioplasty-Free Hemodialysis Access Patency of Recurrent Obstructive Lesions," *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, Vol.46, Issue6, pp.726~732.
- (2) Lee, C. H., Roh, J.-W., Lim, C.-Y., Hong, J. H., Lee, J. K. and E. Min, G., 2011, "A Multicenter, Randomized, Double-blind, Placebo-Controlled Trial Evaluating the Efficacy and Safety of a Far Infrared-Emitting Sericite Belt in Patients with Primary Dysmenorrhea," *Complementary Therapies in Medicine*, Vol.19, Issue4, pp.187~193.
- (3) Chen, S.-C., Lin, S.-H., Lai, M.-J., Peng, C.-W. and Lai, C.-H., 2013, "Therapeutic Effects of Near-infrared Radiation on Chronic Neck Pain," *Journal of Experimental & Clinical Medicine*, Vol.5, Issue4, pp.131~135.
- (4) Yang, H., Mao, H., Wan, Z., Zhu, A., Guo, M., Li, Y., Li, X., Wan, J., Yang, X., Shuai, X. and Chen, H., 2013, "Micelles Assembled with Carbocyanine Dyes for Theranostic Near-Infrared Fluorescent Cancer Imaging and Photothermal Therapy," *Biomaterials*, Vol.34, Issue36, pp.9124~9133.
- (5) Beaver, R., 2010, "Do Far-infrared Saunas Have Cardiovascular Benefits in People with Type 2 Diabetes?," *Canadian Journal of Diabetes*, Vol.34, Issue2, pp.113~118.
- (6) Wang, C., Tao, H., Cheng, L. and Liu, Z., 2011, "Near-Infrared Light Induced in vivo Photodynamic Therapy of Cancer Based on Upconversion Nanoparticles," *Biomaterials*, Vol.32, Issue26, pp.6145~6154.
- (7) Funayama, T., Tsukanishi, T., Hara, I., Ozeki, E. and Sakane, M., 2013, "Tumor-Selective Near-Infrared Photodynamic Therapy with Novel Indocyanine Green-Loaded Nanocarrier Delays Paralysis in Rats with Spinal Metastasis," *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, Vol.10, Issue4, pp.374~378.
- (8) Purushothuman, S., Nandasena, C., Johnstone, D. M., Stone, J. and Mitrofanis, J., 2013, "The Impact of Near-Infrared Light on Dopaminergic Cell Survival in a Transgenic Mouse Model of Parkinsonism," *Brain Research*, Vol.1535, No.16, pp.61~70.

- (9) Hong, Y. R., 2011, "Effects of Heat Therapy Using a Far Infrared Rays Heating Element for Dysmenorrhea in High School Girls," *Journal of Korean Academy of Nursing*, Vol.41, No.1, pp.141~148.
- (10) Kim, H. J., Lee, H., Kang, T. H., Nyung, H. B., Han, C. S. and Cho, S. C., 2009, "Agricultural Process and Food Engineering ; Growth Characteristics of Cherry Tomato in Greenhouse using Far Infrared Heating Systems," *Journal of Biosystems Engineering*, Vol.34, No.3, pp.161~166.
- (11) No, J. K., Kim, H. J., Lee, H., Han, C. S. and Cho, S. C., 2006, "Thermal Energy Characteristics for Greenhouse Heating System with Far-Infrared Heater," *Journal of Biosystems Engineering*, Vol.31, No.6, pp.529~534.
- (12) Choi, T. S., 2001, "Radiation Characteristics of Far Infrared Radiation," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol.15, No.1, pp.31~37.
- (13) Lee, H. K., 2005, "A Study on Evaluation System of Warming Effect Caused by Far Infrared Radiation," Ph.D. Thesis.