

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.5.303>

ISSN 1226-4881(Print)

2288-5324(Online)

광 조사에 따른 온도분포를 이용한 생체조직 내 비정상조직 탐지에 대한 연구

고 동 국* · 임 익 태**†

* 전북대학교 공과대학 기계공학과, ** 전북대학교 공과대학 기계설계공학부

A Study on the Detection of Abnormal Tissues in Biological Tissue Using Temperature Distribution According to Light Irradiation

Dong Guk Ko* and Ihk-Tae Im**†

* Dept. of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Design Engineering, College of Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received July 28, 2016 ; Revised November 24, 2016 ; Accepted February 27, 2017)

Key Words: Abnormal Tissue(비정상조직), Computational Heat Transfer(전산열전달), Light Irradiation(광 조사), Temperature Distribution(온도분포)

초록: 본 연구에서는 비정상조직(파라핀)을 가진 생체조직에 광을 조사하고 그에 따른 조직의 표면온도와 비정상조직 주위에서의 온도분포를 실험과 해석적 방법을 통해 분석하였다. 파라핀을 이용하여 비정상 조직을 모사한 후 조사하는 광의 파장과 시간을 변화시키면서 조직 주위에서의 온도를 K형 열전대를 사용하여 측정하였다. 또한 전산열전달 기법을 이용하여 해석적으로 조직에 대한 온도분포를 예측하였다. 정상조직과 비정상조직의 주위에서의 온도는 차이가 있었으며, 비정상조직이 있는 경우 표면과 조직 주위의 온도가 높게 나타났다.

Abstract: In this study, the characteristics of the temperature generated by light irradiation, on the surface of a biological tissue with an abnormal tissue part (paraffin) and at the surroundings of the abnormal tissue were studied by numerical and experimental methods. The temperature in the tissue was solved using the computational heat transfer and was compared with the temperature measured with thermocouples. The effects of the light wavelength and the irradiation time on the temperature distribution were analyzed. As a result, the temperature distribution from the irradiation of light in the biological tissue was different when there was an abnormal tissue part. The temperature in the biological tissue with the abnormal tissue part was higher than in a normal tissue.

1. 서 론

급속한 기술개발과 산업화로 인하여 여러 유해 물질이 우리 주변에 존재하고 있으며 이와 관련하여 많은 사람들이 암(cancer)을 비롯한 여러 질환의 위협에 노출되어 있다. 현대의 여러 질환은 병이 진행되면 치료가 쉽지 않기 때문에 초기에 이를 발견하고 진단하는 것이 중요하다. 인체 피부 조직에 발생하는 여러 가지 종양(lesions)의 경

우에도 이를 진단하는 기술이 치료기술에 못지않게 중요해지고 있다. 현재 대부분의 의료기관에서는 PET-CT나 MRI 등의 고가장비를 이용하여 암과 같은 종양을 진단하고 있다. 이러한 점을 고려할 때 진단 시 환자의 통증과 같은 부작용이 적고 진단 가격이 저렴하면서도 간단히 진단할 수 있는 기술이나 장비의 개발이 매우 중요하다. 그러나 아직 이와 같은 저비용 장비의 개발에 관한 연구는 미흡하다. 저비용 진단기술에는 빛이나 열을 이용한 방법이 대표적인데 이러한 기술을 이용한 진단장비는 보통 PET-CT 또는 MRI

† Corresponding Author, itim@jbnu.ac.kr

장비보다 훨씬 저렴하지만 정상세포의 괴사(necrosis)와 같은 부작용이 적은 장점이 있다. 빛이나 열을 이용한 진단방법은 또한 비침습적(non-invasive) 진단 방법으로 환자입장에서 진단의 편의성도 높다. 이러한 측면에서 진단이 필요한 조직의 표면에 광을 조사하는 경우 인체조직의 대사나 조직과 표면에서의 온도특성에 대한 연구 또한 중요하다.

Ito 등⁽¹⁾은 근적외선(789 nm) 파장을 인체와 닭의 피부조직에 조사했을 경우 조직의 표면 부근 온도가 1.5 mm 깊이까지 선형적인 증가를 보인다고 하였으며, Amber 등⁽²⁾은 적외선 카메라를 이용하여 종양 부위를 촬영하는 경우 종양(malignancy of lesions)의 크기에 따른 적외선 카메라의 민감도(sensitivity)와 특이성(specificity)을 고찰하였다. 그리고 Santa Cruz 등⁽³⁾은 피부의 정상조직과 결절성 흑색종(nodular melanoma) 조직 부위를 적외선 카메라를 이용하여 촬영하고 종양의 크기에 따른 진단결과를 분석하였다. 한편 Shih 등⁽⁴⁾과 Choi 등⁽⁵⁾은 피부조직에 사인 주기의 열을 가할 경우 피부의 깊이와 시간에 따른 조직의 온도분포를 연구하였다. 또한 Im 등⁽⁶⁾은 광을 이용한 가열 치료 시 인체 피부조직의 온도분포와 화상가능성을 수치적으로 연구하였다. 이들 연구는 치료나 진단을 위해 외부에서 열을 가하는 경우 피하조직의 온도변화에 대해 연구함으로써 외부 열원 설계를 위한 기본적 자료를 제공해 준다.

이들 연구는 광을 이용한 외부 가열과 그에 따른 온도변화의 측정을 통해 비정상 피부조직에 대한 진단이 가능함을 보여준다. 정상적인 조직과 종양과 같은 비정상 조직은 혈류량뿐만 아니라 물성치도 차이가 나므로 온도분포도 다르게 나타날 것이다. 따라서 적절한 파장의 광을 피부조직에 조사한 경우 나타나는 생체조직 내부의 열전달 현상의 차이를 이용하여 비정상 조직의 발견이나 치료 가능성에 대한 연구가 필요하다.

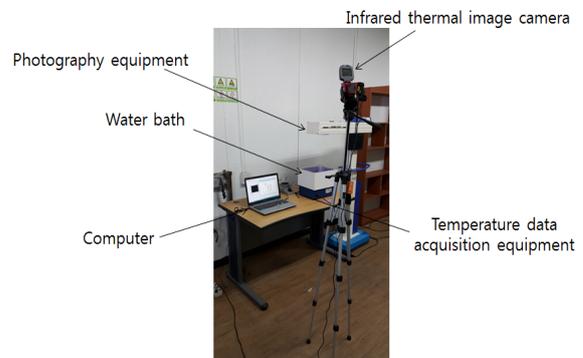
본 연구에서는 이와 같은 가능성을 확인하기 위하여 조직내부에 비정상 조직이 존재할 경우 조직과 그 주변에서의 온도분포를 실험과 해석을 통해 구하고자 하였다. 생체조직으로는 인체의 생체조직과 유사한 돼지고기의 전지(arm shoulder) 부분을 사용하였으며 비정상조직을 모사하기 위하여 전지내부에 구형의 파라핀을 주입하였다.

그 이후 피부 쪽 표면에 광을 조사하고 비정상조직의 유무에 따른 조직 주위에서의 온도를 측정하였다. 또한 수치해석 방법을 이용하여 조직 내의 온도분포를 구하였다. 연구 결과는 광 조사를 이용하여 생체조직 내의 비정상조직을 파악하거나 치료의 가능성을 확인하는 데에 활용될 수 있을 것이다.

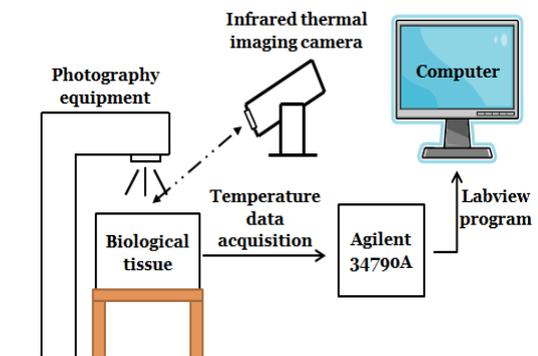
2. 실험장치 구성 및 방법

2.1 실험장치 구성

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치와 모식도를 나타낸 것이다. 실험장치는 광 조사장치, 항온수조, 온도 데이터 획득 장치 및 적외선 카메라로 구성되어 있다. 실험에 사용된 광 조사장치(미소텍 B&H, Derma Light; DLA-XXX)는 세 가지 파장 즉 파란색 가시광선(410 nm), 적색 가시광선(635 nm) 및 적외선(830 nm) 광의 조사가 가능하다. 항온수조(대한과학, WB-6/11/22)는 생체조직의 아랫면을 실제 피부조직의 내부온도인 37 °C로 일



(a) Experimental equipments



(b) Schematic of the experimental setup

Fig. 1 Installation of the experimental equipments and schematic diagram

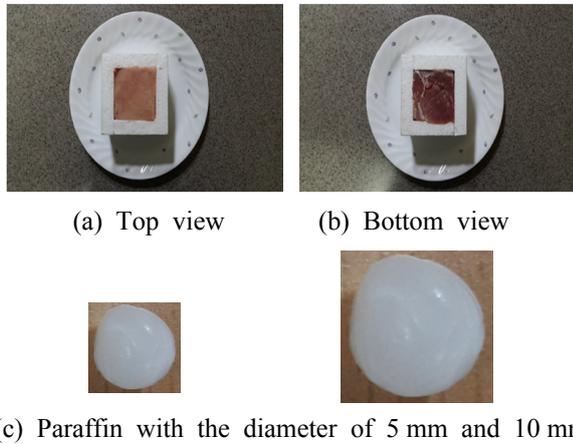


Fig. 2 Preparation of the biological tissue with abnormal tissue

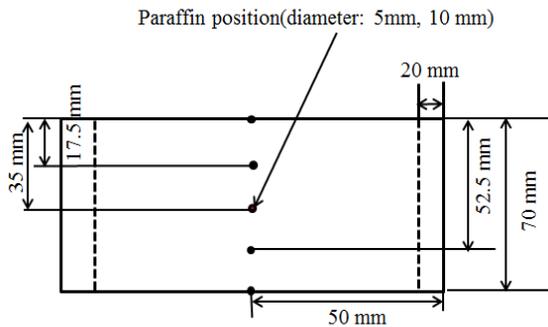


Fig. 3 Temperature measurement points of the biological tissue

정하게 유지시키기 위해 사용하였다. 생체조직 표면의 가열된 온도를 측정하기 위해 K형의 열전대 1개를 표면에 부착하였으며, 내부의 온도를 측정하기 위해서는 동일한 형식의 막대형 열전대 4개를 생체조직에 삽입하여 설치하였다.

온도의 측정위치는 조직의 표면에서 부터 깊이 방향으로 각각 17.5 mm, 35 mm, 52.5 mm 및 75 mm에 해당된다. 또한 표면온도의 보정을 위하여 적외선 열화상카메라(SDS, Hot find D, 정확도; $\pm 2^\circ\text{C}$)를 사용하였으며 이 때 암막 커튼을 설치하여 외부로부터 빛의 간섭을 차단하였다.

2.2 실험방법

Fig. 2는 생체조직인 돼지고기 전지부위의 윗면과 아랫면 그리고 비정상조직인 구형의 파라핀으로 지름이 5 mm와 10 mm인 것을 나타낸 것이다. 생체조직의 주위는 외부로의 열손실을 차단하기 위하여 단열처리를 하였다.

Fig. 3은 생체조직의 표면과 파라핀 주위에서의

Table 1 Properties of the biological tissue and paraffin^(9,10)

Components	Epidermis	Dermis	Hypo-dermis	Paraffin
ρ (kg/m ³)	1200	1200	1000	900
C_p (kJ/kg·K)	3600	3300	3000	1340
k (W/m·K)	0.25	0.45	0.2	0.24
Thickness (mm)	5	35	30	5, 10

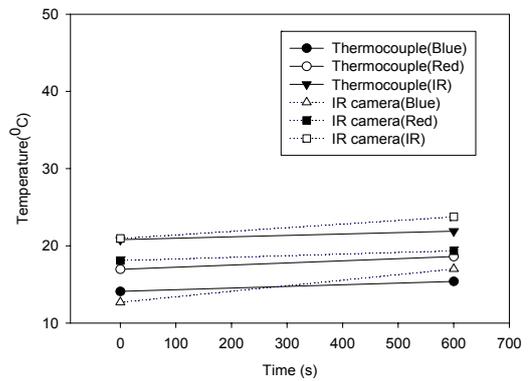


Fig. 4 Comparison of measured surface temperature from the thermocouple and infrared camera

온도를 측정하기 위해 설치한 열전대의 위치를 나타낸 것이다. 단열재의 치수나 열전대 삽입에 대한 모식도는 참고문헌 (7)에 더 자세히 나타나 있다. 생체조직의 아랫면은 조직내부의 평균온도인 37°C로 일정하게 유지시켰다. 비정상조직인 구형의 파라핀을 생체조직의 중심에 삽입하였으며, 광조사의 높이(H)는 조직의 표면으로부터 20 cm 위에 해당된다.

Table 1은 생체조직의 표피, 진피, 피하조직 및 조직내부에 삽입된 파라핀의 물성치를 나타낸 것이다.^(8,9) 파라핀은 생체조직의 내부에 존재할 경우 조직내부로 침투성과 조직에 대한 압통 그리고 주변조직의 괴사를 발생시키는 종양과 유사하여 의료용 임상분야에서 비정상조직으로 활용되고 있다.⁽¹⁰⁾ 실험에서 온도측정 시 항온수조에 의한 열전달의 영향을 배제하기 위하여 광을 조사하지 않고 30분 동안 생체조직을 항온수조 내에서 유지시켜 조직의 높이 방향으로의 온도분포를 정상상태로 만든 후 본 실험을 수행하였다. 또한 열전대를 이용하여 측정한 온도 값의 신뢰성을 검토하기 위하여 적외선 카메라로 측정한 온도 값과 비교하였다.

Fig. 4는 생체조직의 표면에 서로 다른 파장의

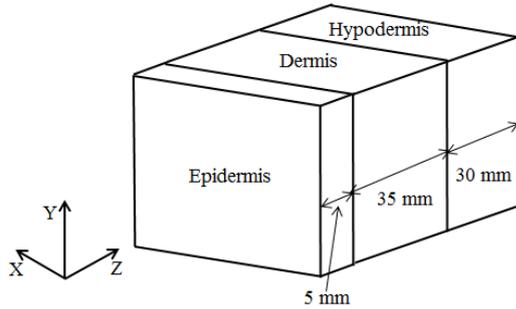


Fig. 5 Schematic diagram of a tissue including epidermis, dermis and hypodermis

광을 600초 동안 조사했을 경우 열전대와 적외선 카메라를 이용하여 측정된 표면의 온도 값을 비교한 것이다. 동그라미와 역삼각형으로 나타낸 것은 열전대를 사용하여 측정된 온도 값이며, 삼각형과 사각형으로 표시한 것은 적외선 카메라로 측정된 값이다. 두 측정값은 최대 1.8 °C, 비율로는 2.7% 내에서 일치하였다. 따라서 조직 내부의 온도를 측정하기 위하여 사용된 열전대의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

Fig. 5는 본 연구에서 고려한 해석대상 영역이며 영역을 구분하여 나타낸 것은 서로 다른 조직을 나타내기 위한 것이다. 하부의 숫자는 각 조직의 두께이고 각 조직의 물성치는 Becker 등⁽⁸⁾과 Jin 등⁽¹⁰⁾이 사용한 값을 참고하였다. 해석대상에 대한 생체열전달 방정식(bio heat transfer equation)은 아래와 같다.⁽⁸⁾

$$\rho_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \nabla \cdot (k_t \nabla T_t) + Q_{bl} + Q_{met} + Q_i \quad (1)$$

여기서 ρ_t , c_t , k_t 는 각각 조직의 밀도(kg/m³), 비열(J/kg·K) 및 열전도율(W/m·K)을 의미한다. 그리고 Q_{bl} 과 Q_{met} 는 각각 혈액의 관류율과 신진대사에 의한 생성향을 나타낸 것으로서 본 연구에서는 죽은 돼지고기의 전지부위를 실험 대상으로 선정하였기 때문에 이 항들을 무시할 수 있다. 따라서 해석에서 고려한 생성향은 Q_i 이며 아래 식으로 계산한 값을 사용하였다.

$$Q_i = c_{ep} m_e \Delta T \quad (2)$$

Table 2 Optical properties of the biological tissue⁽⁸⁾

Components	Epidermis	Dermis	Hypodermis
μ_s (1/m)	8,000	8,000	7,000
μ_a (1/m)	355	49	50

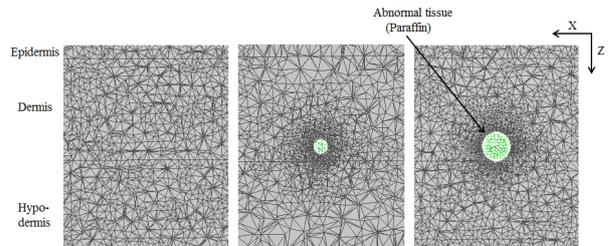


Fig. 6 Mesh generation at the cross section of the numerical model, (a) without paraffin, (b) 5 mm diameter paraffin and (c) 10 mm diameter paraffin in the biological tissue

여기서 c_{ep} , m_e , ΔT 는 각각 표피의 비열, 질량(25 g), 표면온도와 대기온도의 차를 나타낸다.

3.2 격자구성

Fig. 6은 수치해석을 수행하기 위하여 생성한 격자를 나타낸 것으로서 해석모델 중심을 포함한 y-z단면을 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a)는 생체조직에 비정상조직(파라핀)이 없는 경우이며 (b)와 (c)는 각각 5 mm와 10 mm 직경의 비정상조직이 생체조직의 중심에 있는 경우로서 비정상조직과 그 주위에 격자를 조밀하게 구성시켰다. 해의 정확성과 수렴시간 그리고 격자 의존성 평가 결과(격자수 26,419, 32,981, 55,129의 세 가지) 등을 고려하여 격자의 최소크기와 수를 각각 1 mm와 55,129개로 설정하였다.

3.3 해석방법

본 연구에서는 표피, 진피 및 피하조직으로 구분되는 생체조직에 세 가지 파장의 광을 조사하면서 물성치가 서로 다른 조직에서의 온도분포를 파악하고자 하였다. 조직 내에 비정상조직이 존재할 경우 조직 주위에서의 온도특성을 분석하고자 식 (1)의 지배방정식을 상용 프로그램인 ANSYS-FLUENT 16.0을 사용하여 풀이하였다.

Table 2는 해석에 사용된 생체조직의 각 부위에서의 광에 대한 물성치를 나타낸 것으로서 μ_s 와 μ_a 는 각각 광에 대한 산란계수(scattering coefficient)와 흡수계수(absorption coefficient)이다.⁽⁸⁾ 산란계수와 흡수계수는 해석대상의 복사 열전도 방정식을

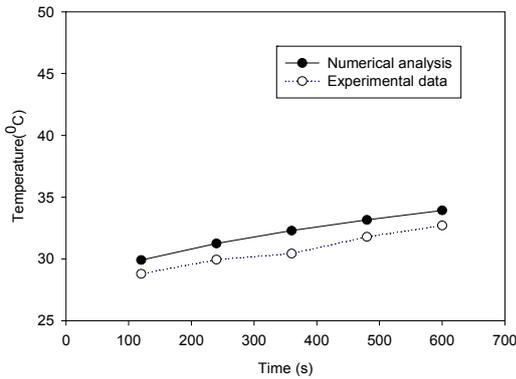


Fig. 7 Comparison of the experimental and numerical results at the surface of the tissue without paraffin according to exposure time by blue irradiation

DO(Discrete ordinate) 기법을 사용하여 해석할 때 적용하였다.

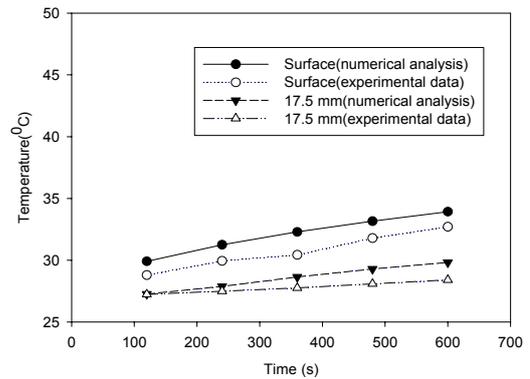
4. 결과 및 고찰

4.1 해석결과의 타당성 검증

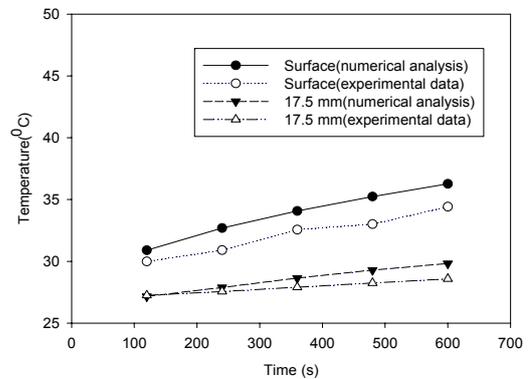
Fig. 7은 파란색 가시광선을 600 초 동안 조사한 경우 비정상조직이 없는 생체조직의 표면에서 측정된 온도 값과 해석결과를 비교한 것이다. 조직 표면에서의 실험값과 해석결과는 모두 광을 조사하는 시간이 증가할수록 상승하였다. 측정값은 2회의 반복 실험을 통하여 얻은 결과를 산술평균한 것이며, 광조사에 따른 측정값과 해석결과는 최대 2.7°C 이내에서 일치하는 분포를 나타내었다. 오차는 해석모델과 실험에 사용한 샘플의 각 조직의 두께나 물성 값의 차이에서 주로 비롯된 것으로 보인다.

4.2 광 파장의 영향

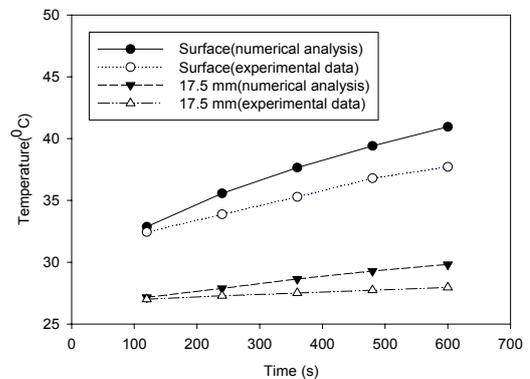
Fig. 8은 생체조직에 비정상조직이 없는 경우 광의 파장을 변화시켜가면서 조직의 표면과 조직의 깊이 방향으로 Z=17.5 mm(진피영역) 위치에서 측정된 온도 값과 해석결과를 비교한 것이다. 측정위치는 항온수조에 의한 온도의 영향을 배제하고 생체조직의 온도변화가 가장 크게 나타난 부분을 선택하였다. 광 파장의 길이가 증가할수록 조직의 표면온도는 크게 상승하였으며, 조직표면의 초기온도(120초) 또한 높게 나타났다. 반면 생체조직에 대한 광 파장의 침투도가 낮아 진피영역인 Z=17.5 mm에서의 온도는 파장변화에 상관없



(a) Blue



(b) Red



(c) IR

Fig. 8 Temperature distributions in the biological tissue without paraffin according to the variation of light wavelength

이 낮게 나타났다. 600초 동안 광을 조사했을 경우 실험값은 해석결과보다 낮게 나타났다. 해석시 공기 층의 대류열전달 계수(h)와 방사율(ϵ)을 각각 $2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{(11)}$ 와 $0.95^{(7)}$ 로 설정하였는데 열손실량이 실험값보다 상대적으로 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 해석에서 상·하부 이외의 측면을 단열로 하였는데 실험에서는 어느 정도의 열손실이 있기 때문이기도 하다.

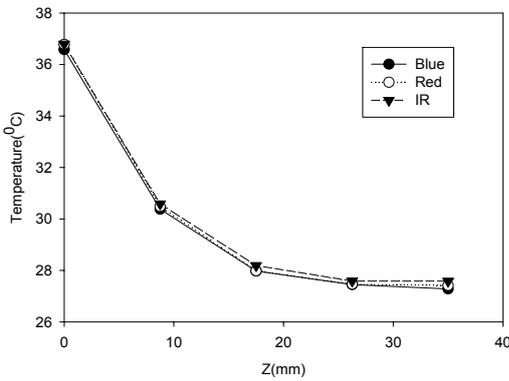
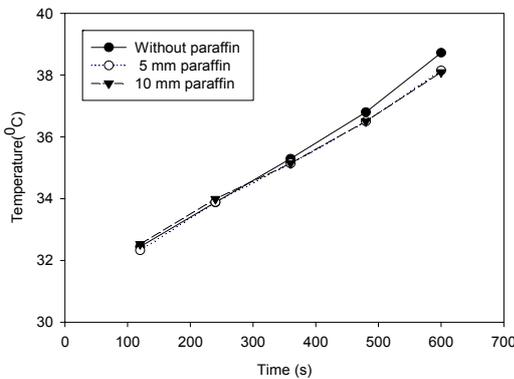
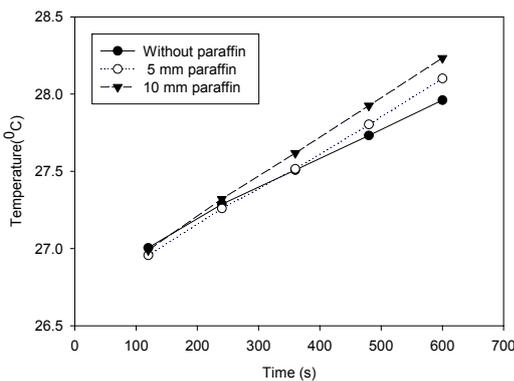


Fig. 9 Temperature distributions from $z=0$ mm to $z=35$ mm of biological tissue with 10 mm dia-meter paraffin at 600 seconds.



(a) Surface



(b) $Z=17.5$ mm

Fig. 10 Temperature distributions at the biological tissue according to existing paraffin when the IR wavelength was irradiated

4.3 비정상 조직의 영향

Fig. 9는 10 mm 직경의 구형 파라핀이 있는 생체조직에 파란색 가시광선과 적색 가시광선 그리고 적외선 파장을 600초 동안 조사한 경우 파장 변화에 따른 조직의 표면($Z=0$ mm)으로부터 중심($Z=35$ mm)까지의 온도분포를 나타낸 것이다. 적색

가시광선과 적외선 파장을 조사했을 경우 파란색 가시광선과 비교하여 조직의 표면온도는 약간 높게 나타났다. 특히 적외선 파장을 조사한 경우 조직의 내부온도는 다른 파장에 의한 온도 값보다 더 크게 상승하여 조직의 표면온도가 내부로 빠르게 전달되었다.

Fig. 10은 생체조직에 비정상조직이 없을 경우와 5 mm 및 10 mm 직경의 비정상조직이 있을 경우 적외선 파장을 조사하면서 조직의 표면과 조직의 깊이 방향으로 $Z=17.5$ mm 위치에서 측정된 실험값을 나타낸 것이다. 비정상조직이 생체조직 내부에 존재할 경우 조직의 표면온도와 $Z=17.5$ mm에서 온도 값은 거의 선형적으로 상승하였으며, 600초 동안 광을 조사했을 경우 조직의 표면온도 값은 정상조직의 표면온도보다 낮게 나타났다. 이 결과는 비정상 조직인 파라핀이 조직 표면을 통해 전달된 열을 생체조직 보다 더 잘 흡수하기 때문으로 생각된다. 따라서 $Z=17.5$ mm에서 측정된 온도 값은 정상조직의 값과 비교하여 더 크게 상승하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 파란색 가시광선과 적색 가시광선 그리고 적외선 파장의 광을 생체조직의 표면에 조사했을 경우 조직 내 비정상조직의 유무에 따른 조직에서의 온도특성을 실험적 방법과 해석적 방법을 이용하여 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 생체조직에 대한 광파장의 침투도가 낮아 조직의 내부온도는 매우 낮은 결과를 보였다.
- (2) 해석결과 생체조직에 비정상조직이 있을 경우 적외선 파장의 광 조사 시 조직의 표면온도는 시간에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며 실험결과와 비교하여 조금 높게 나타났다. 또한 적외선 파장을 조사했을 경우 가열효과가 다른 파장보다 조직 내부로 빠르게 전달되었다.
- (3) 적외선 파장의 광을 생체조직의 표면에 600초 동안 조사한 경우 비정상조직이 있는 조직의 표면온도는 낮게 나타난 반면 $Z=17.5$ mm에서의 내부온도는 정상조직과 비교하여 상대적으로 높게 나타났다.

따라서 비침습적 방법 중 하나인 광 파장을 이용하여 생체조직의 내부에 파라핀과 유사한 물성치를 가진 조직에 대한 진단과 검출이 가능할 것

으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사를 표합니다(No.20132007077).

참고문헌

(References)

- (1) Ito, Y., Kennan, R. P., Watanabe, E. and Koizumi, H., 2000, "Assessment of Heating Effects in Skin During Continuous Wave Near Infrared Spectroscopy," *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 5, No. 4, pp. 383~390.
- (2) Amber, L., Shada, Lynn T., Dengel, Gina, R., Petroni, Mark E, Smolkin, MS., Scott Acton, and Craig L, Slingluff Jr, 2013, "Infrared Thermography of Cutaneous Melanoma Metastases," *Journal of Surgical Research*, Vol. 82, pp. 9~14.
- (3) Santa Cruz, G.A., Bertotti, J., Marin, J., Gonzalez, S.J., Gossio, S., Alvarez, D., Roth, B.M.C., Menendez, P., Pereira, M.D., Albero, M., Cubau, L., Orellano, P. and Liberman, S.J., 2009, "Dynamic Infrared Imaging of Cutaneous Melanoma and Normal Skin in Patients Treated with BNCT," *Journal of applied radiation and isotopes*, Vol. 67, pp. 554~558.
- (4) Shih, T. C., Yuan, P., Lin, W. L. and Kou, H. S., 2007, "Analytical Analysis of the Pennes Bioheat Transfer Equation with Sinusoidal Heat Flux Condition on Skin Surface," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 29, pp. 946~953.
- (5) Choi, W. L., Moon, S. D., Yoon, S. B. and Im, I. T., 2011, "Analysis of the Bioheat Equation Considering Tissue Layers with Sinusoidal Temperature Oscillation on the Skin," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 8, pp. 757~762.
- (6) Im, I. T., Yoon, S. B. and Kim, K. W., 2015, "Numerical Study on the Temperature Profiles and Degree of Burns in Human Skin Tissue during Thermal Therapy," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 67, No. 9, pp. 921~933.
- (7) Ko, D. G., Bae, S. W. and Im, I. T., 2015, "A Study on the Boundary Condition for Analysis of Bio-heat Equation According to Light Irradiation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 11, pp. 853~859.
- (8) Sid M. Becker and Andrey V. Kuznetsov., 2015, *Heat Transfer and Fluid Flow in Biological Processes*, Academic Press, London.
- (9) Lee, J. H and Kim, T. H., 2001, "A Experimental Study on the Ultrasonic Influence for Melting the Paraffin and the Ice," *The Society of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 13, No. 11, pp. 1106~1113.
- (10) Jin, S. Y., Kim, M. H., Kim, H. J., Shim, D. T., Kim, S. W. and Kim, C. D., 2003, "Contemporary Augmentation Rhinoplasty with Autogenous Cartilage Grafts After Removal of Nasal Paraffinoma," *Korean Society of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*, Vol. 46. No. 9, pp. 752~757.
- (11) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2008, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fourth Edition, Willey, Toronto.