

논문 2005-42SC-2-4

생체의 온도 측정을 위한 수정된 마이크로파 라디오-써모미터 (Modified Microwave Radio-thermometer for Measuring Temperature of Living Body)

김 태 우*, 조 태 경**, 박 병 수***

(Tae-Woo Kim, Tae-Kyung Cho, and Byoung-Soo Park)

요 약

본 논문은 생체의 내부 온도를 측정하기 위해서 매질 특성 추정기와 다중 온도 변환표를 갖는 수정된 마이크로파 라디오-써모미터(modified microwave radio-thermometer, MRTM)를 제안한다. 매질 특성 추정기는 생체의 유전율, 도전율, 두께, 형태와 같은 매질의 특성에 대한 데이터를 온도 검색 장치에 전달한다. 다중 온도 변환표를 갖는 온도 검색 장치는 이 변환표들 중 하나를 선택하여 측정된 방사 전력에 해당하는 온도값을 계산한다. 실험에서 MRTM은 37°C의 온도에서 증류수와 혼합 용액에 대해서 0.82°C~7.68°C까지의 측정 오차를 줄일 수 있었다.

Abstract

This paper presents a modified microwave radio-thermometer (MRTM) with material characteristic estimator and multiple temperature conversion tables to measure subcutaneous temperature of a living body. This estimator provides a temperature retrieval unit with the data of material characteristics such as permittivity, conductivity, thickness and geometry of the living body. The temperature retrieval unit with multiple temperature conversion tables can select one of the tables and computes temperature value corresponding to measured radiation power. In the experiments, it was shown that the MRTM could reduce measurement errors of about 0.82°C to 7.68°C for the cases of distilled water and mixed liquid at the temperature of 37°C.

Keywords: 매질 특성 추정기, 마이크로파 라디오-써모미터, 다중 온도 변환표, 내부 온도

I. 서 론

마이크로파 라디오-써모미터 (microwave radio-thermometer)는 비침습적 진단 도구로서 생체의 내부 온도 분포를 모니터링 하는 데에 적용되어 왔다.

라디오-써모미터를 이용한 진단은 생체로부터 나오는 열방사(thermal radiation)를 측정하여 분석함으로써

가능하다.

이 열방사 전력은 생체의 열역학적 온도와 관련되어 있다. 생체의 피하 내부에서부터 방사되어 피부 표면으로 전달되는 열방사 신호는 생체 표면에 라디오-써모미터를 접촉하여 측정되는 것이다. 생체 조직의 내부 온도를 측정하기 위해서, 라디오-써모미터는 1~6 GHz 범위의 주파수 범위를 사용하며, 이 주파수 범위는 전자파가 조직 표면으로부터 5 cm까지 침투할 수 있다.

이 범위의 주파수 범위에서는 방사 강도(radiation intensity)는 그림 1과 같이 Plank의 법칙의 Rayleigh-Jeans 근사화^[1]에 의해 내부 온도에 대해 거의 선형적으로 변화한다. 이 원리와 측정 기법에 기초한 라디오-써모미터는 생체에서 종양의 조기 검출을 위해 사용될 수 있다^{[2][3][4][5][6][7]}.

라디오-써모미터는 단일 주파수(또는 단일 프로브)

* 평생회원, 한양사이버대학교 정보통신학과
(Dept. of Information and Communication Engineering, Hanyang Cyber University)

** 평생회원, 상명대학교 정보통신공학과
(Dept. of Information and Communication Engineering, Sangmyung University)

*** 정회원, 상명대학교 컴퓨터시스템공학과
(Dept. of Computer System Engineering, Sangmyung University)

접수일자: 2004년10월27일, 수정완료일: 2005년3월8일

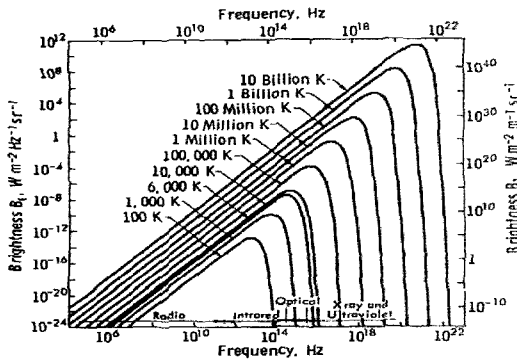


그림 1. 매질의 온도와 주파수에 따른 방사전력
Fig. 1. Radiation power according to material temperature and radiation frequency.

라디오미터(radiometer)와 다중 주파수(또는 다중 프로브) 라디오미터로 분류될 수 있다^[6]. 단일 주파수 라디오미터는 하나의 주파수를 사용하여 생체의 각 위치에서 측정되는 하나의 라디오파 신호로부터 조직의 온도를 추정하는 것이다. 다중 주파수 라디오미터에서 온도 검색은 몇 개의 주파수를 이용하여 생체의 각 위치에서 측정된 다중의 라디오파 데이터로부터 생체 조직의 온도 분포를 추정하는 것이다. 다중 주파수 라디오미터는 단일 주파수 라디오미터보다 조직의 온도에 대한 정보를 더 많이 제공할 수 있지만, 측정될 각 위치에서 다른 주파수에 따른 프로브로 몇 번의 측정을 반복해야 한다. 단일 주파수 라디오미터는 몇몇 임상 실험^{[6][7]} (<http://www.resltd.ru>)에서 성공적이었다. 현재 상업화되어 있는 제품인 RTM-01-RESTM (<http://www.resltd.ru>)와 RT-17TM (Uniom Corp., Nizny Novogorod, Russia)는 단일 주파수 라디오-써모미터이다. 본 연구는 유방암과 같은 생체 종양의 조기 검출을 위한 대량 진단에 비용이 적게 드는 단일 주파수 라디오미터 방법에 초점을 맞춘다.

기존의 단일 주파수 마이크로파 라디오-써모미터 (conventional single-frequency microwave radio-thermometer, CRTM)^{[1][4][6][7]}을 이용하여 생체의 내부 온도를 측정하기 위해서, 유방, 머리, 간 등과 같은 생체 조직은 몇 개의 전자기적 파라미터로 정의되는 물체로 모델링된다. 라디오-써모미터는 특정 전자기적 특성을 갖는 조직 모델에 캘리브레이션(calibration)된다. 이때 라디오미터는 캘리브레이션 모델과 다른 생체 조직에 대해서는 내부 온도를 측정하는데 오차가 발생할 수 있다. 예를 들어, 정상적인 유방은 유전율(permittivity, ϵ_r)과 도전율(conductivity, σ)은 각각 $\epsilon_r = 9.8 \sim 51.3$, $\sigma = 0.37 \sim 3.4$ S/m을 갖는다^[8]. 유방은 서로 다른 유전

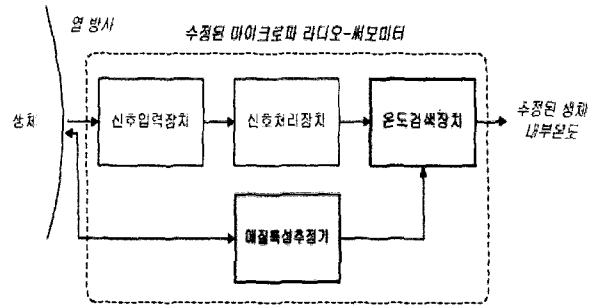


그림 2. 매질 특성 추정기와 다중 온도 변환표를 작성 MRTM의 구성도
Fig. 2. Schematic configuration of MRTM with material characteristic estimator and multiple temperature conversion tables.

체 특성을 가지므로, 특정 조직에 캘리브레이션된 CRTM은 다른 조직의 내부 온도에 대해서는 측정 오차를 가질 수 있다.

본 논문은 CRTM이 조직의 여러 가지 유전체 특성과 두께에 대해서 측정 오차를 가질 수 있음을 논하고, 이 오차를 줄이기 위한 수정된 라디오-써모미터(modified radio-thermometer, MRTM)를 제안한다.

MRTM은 그림 2와 같이 신호 입력 장치, 신호 처리 장치, 온도 검색 장치, 매질 특성 추정기로 구성된다. 매질 특성 추정기는 생체의 유전체 특성, 두께, 형태와 같은 매질 특성에 대한 데이터를 온도 검색 장치에 제공한다. 다중 온도 변환표를 갖는 온도 검색 장치는 다중의 변환표들로부터 하나의 변환표를 선정하여 측정된 방사 전력에 해당하는 온도 값을 계산한다. 온도 변환표는 측정된 방사 전력을 물체의 온도에 관련시키는 변환 함수가 된다.

II. 마이크로파 라디오-써모미터의 원리

생체의 특정 부위로부터 나오는 열방사는 다음 식과 같이 마이크로파 라디오미터를 이용하여 밝기 온도(brightness temperature)^[4]로서 측정된다.

$$T_{B,i} = \frac{P_i}{k\Delta f_i} \tag{1}$$

여기서, P_i 는 중심 주파수 f_i 에서 주파수 대역폭 Δf_i 에 대해서 라디오미터에 의해 측정되는 열방사 전력이고, k 는 Boltzmann 상수, $T_{B,i}$ 는 f_i 에서 밝기 온도이다. 일련의 라디오파 데이터 $T_{B,i}$ ($i=1, 2, \dots, n$)를 얻기 위해서는 몇 개의 중심 주파수 f_i ($i=1, 2, \dots, n$)에서

측정된다. 밝기 온도 $T_{B,i}$ 는 외부에서 관찰되는 생체의 겉보기 온도이며, 이로부터 생체의 온도 분포는 추정된다. $T_{B,i}$ ^[4]는 다음 식과 같이 계산된다.

$$T_{B,i} = \int_{vol} W_i(r)T(r)dV \quad (2)$$

여기서, dV 는 위치 r 에서 조직의 매우 작은 부피이고, $T(r)$ 는 r 에서 조직 온도, $W_i(r)$ 는 f_i 와 $T_{B,i}$ 에서 라디오파 가중치 함수^[4], 적분은 라디오파 관찰 부피에 대해서 수행된다. 라디오파 관찰 부피는 특정 범위 내의 조직의 부피이며, 관찰 부피에 포함되지 않는 범위에서는 밝기 온도에 기여하는 정도가 거의 무시된다. 물체의 전기적 특성과 기하학적 구조를 나타내는 가중치 함수 $W_i(r)$ 는 생체 조직에 대해서 미리 정의되어 있다. $T_{B,i}$ 와 $W_i(r)$ 가 주어지면, r 에서 조직 온도 $T(r)$ 는 특이 시스템 분석(singular system analysis)^[9], 생체 열전달 해법(bio-heat transfer solution)^[10], Monte Carlo 기법과 결합된 모델 적합 방법(model fitting)^[11]과 같은 몇 가지 알고리즘을 이용해서 검색될 수 있다. 이들 온도 검색 방법들은 생체의 동일 위치에서 n 번의 측정($n \geq 2$)이 필요한 다중 주파수 라디오미터법에 의해 온도 분포를 얻을 수 있다. 한편, 단일 주파수 라디오미터법의 온도 검색에서 $T_{B,i}$ ($i=1$)는 생체의 각 위치에서 한번의 측정으로 관심 부피의 조직 온도 $T(r)$ 의 간단한 평균으로 간주한다. 단일 주파수 라디오-써모미터는 특정 전자적 특성을 갖는 조직 모델에 캘리브레이션된다. 단일 주파수 라디오미터법은 생체의 각 위치에서 단일 프로브로 한번만 측정하므로 유방암과 같은 생체 종양의 조기 검출을 위한 대량 진단에 저비용으로 수행할 수 있다.

III. 수정된 마이크로파 라디오-써모미터

그림 2와 같은 MRTM에서는 신호 입력 장치^[112]는 안테나 또는 프로브를 의미한다. 신호 처리 장치는 증폭기, 필터, 잡음 소스, 스위치, isolator, 검출기 등을 포함한다. 매질 특성 추정기는 생체의 측정될 각 위치의 매질에 대한 유전율, 도전율, 두께, 형태 등을 측정하여 온도 검색 장치로 전달할 수 있다. 또한 측정 부위의 조직에 대해서 특정 주파수 범위의 마이크로파를 방사하

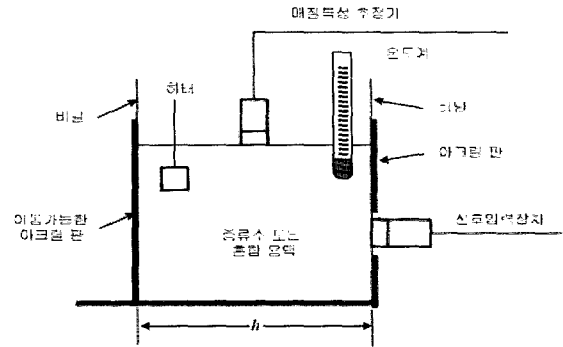


그림 3. 다른 유전체 특성과 두께(h)를 갖는 측정 대상 매질에 대해서 내부 온도와 방사 전력을 측정하기 위한 실험 구성도

Fig. 3. Experimental configuration to measure subcutaneous temperature and radiation power for target materials with different dielectric properties and thickness (h).

여 반사되는 신호의 크기와 위상을 측정한다. 다중 온도 변환표를 갖는 온도 검색 장치는 변환표들 중 하나를 선정하여 측정된 방사 전력에 해당하는 온도를 계산한다. 본 연구의 MRTM은 RT-17TM (Uniom Corp., Nizny Novogorod, Russia) 라디오-써모미터를 신호 입력 및 처리 장치로, HP 8753ES Network Analyzer와 85070C Dielectric Probe(<http://www.agilent.com>)를 매질 특성 추정기로 사용한다. 온도 검색 장치는 온도 변환 소프트웨어와 A/D(analog to digital) 변환기가 설치된 SBC (single board computer)를 포함한다. RT-17는 중심 주파수 1.75 GHz, 대역폭 500 MHz에서 동작한다. 온도 검색 장치의 A/D 변환기는 RT-17로부터 나오는 아날로그 신호(-5~+5V)를 디지털 신호(0~255)로 변환한다. 매질 특성 추정기는 측정 조직의 특성을 측정해서 온도 검색 장치로 전달해 준다.

측정 대상 조직은 생체 조직의 팬텀(phantom)으로서 안쪽을 비닐로 아크릴 상자에 증류수 또는 혼합물을 그림 3과 같이 채운다.

증류수와 증류수에 설탕을 17%, 32%, 44%, 55%, 64% 섞은 5가지의 혼합물을 측정 조직으로 준비하였다. 매질은 히터로 온도가 30℃부터 44℃까지 2℃씩 변화시켰다. 측정 조직의 온도는 라디오-써모미터와 써미스터(thermometer) 측정하였다.

IV. 실험 결과 및 토의

온도 측정기로서 단일 주파수 라디오-써모미터는 매질의 내부 온도를 측정하기 위해서는 캘리브레이션 과

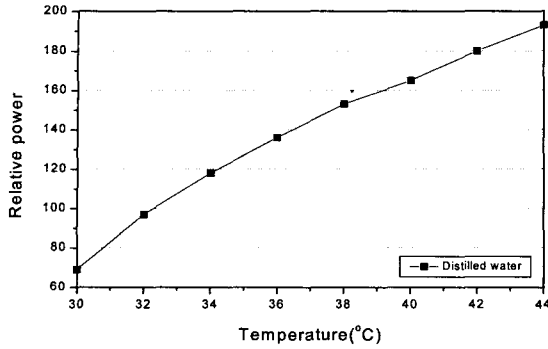


그림 4. CRTM에 사용되는 증류수에 대한 전형적인 온도 변환표

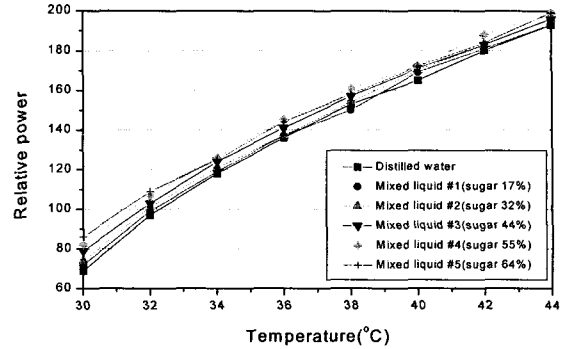
Fig. 4. A typical temperature conversion table for distilled water is used for the conventional single frequency radio-thermometer (CRTM).

정이 필요하다. 캘리브레이션을 하기 위해서 방사 전력은 0~255의 디지털 해상도를 갖는 RT-17로 그림 4와 같이 매질의 표면에서 측정된다. 이 때, 라디오미터로 측정된 방사 전력에 해당하는 온도를 얻기 위해서 온도계로 매질의 내부 온도를 측정하였다. 매질에서 방사 전력 대비 온도는 라디오-써모미터의 온도 변환표를 나타낸다. CRTM에서 전형적으로 사용되는 온도 변환표를 그림 4와 같이 증류수에 대해서 만들었다.

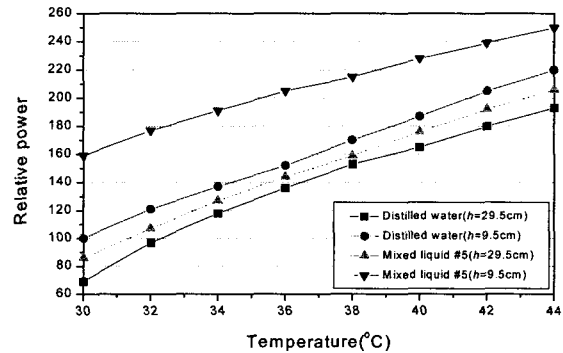
MRTM에 대한 온도 변환표는 그림 5와 같이 서로 다른 유전율과 두께를 갖는 매질에 대해서 만들었다.

CRTM과 MRTM로 내부 온도를 측정하기 위해서, 증류수와 혼합 용액 #5을 인간의 체온인 37°C를 유지하도록 준비하였고, 매질의 두께(h)는 그림 2와 같이 아크릴 판을 평행 이동시켜 9.5 cm와 29.5 cm로 설정하였다. 매질의 내부 온도는 매질의 표면에서 CRTM과 MRTM로 10번씩 측정하였다. 동시에 라디오미터의 측정을 검증하기 위해서 매질 내부의 온도를 온도계로 측정하였다. 1.75 GHz의 주파수에서, 37°C의 온도의 매질에 대해서 상대적 유전율과 도전율을 표 1과 같이 MRTM의 매질 특성 추정기로 측정하였다.

MRTM의 매질 특성 추정기로 사용된 85070C Dielectric Probe는 유전율 상수로 전형적으로 ±5%의 측정 오차를 갖는다. 그러나, 그 반복성은 2~4배로 정확도(<http://www.agilent.com>)가 높아진다. 본 논문의 경우, MRTM이 온도가 알려진 샘플 매질에 기준으로 캘리브레이션되므로 반복성은 유전율 상수를 측정함에 있어서 매우 중요한 요소이다. CRTM과 MRTM는 각각 그림 4와 그림 5와 같이 온도 변환표를 사용하였다.



(a)



(b)

그림 5. MRTM에 사용되는 방사 전력과의 관계를 나타내는 다중 온도 변환표: (a) 서로 다른 유전체 특성을 갖는 몇 가지 매질과 (b) 서로 다른 두께(h)를 갖는 증류수와 혼합 용액 #5에 대한 RT-17로 측정된 방사 전력

Fig. 5. Multiple temperature conversion tables relating radiation power with temperature are used for the MRTM: radiation powers measured by RT-17 (a) for several materials with different dielectric properties, and (b) for distilled water and mixed liquid #5 with different thickness (h).

표 1. 주파수 1.75 GHz에서, 37°C 온도의 증류수와 서로 다른 설탕 농도를 갖는 혼합 용액에 대한 상대 유전율(ϵ_r)과 도전율(σ , S/m)

Table 1. At the frequency of 1.75 GHz, relative permittivities (ϵ_r) and conductivities (σ , S/m) for distilled water and mixed liquids with different sugar concentrations at the temperature of 30°C.

	증류수	혼합용액 #1	혼합용액 #2	혼합용액 #3	혼합용액 #4	혼합용액 #5
ϵ_r	72.59	67.16	61.84	56.34	50.55	45.39
σ	0.23	0.45	0.69	0.89	1.10	1.27

표 2. 주파수 1.75 GHz에서, 37°C 온도의 다른 두께 (h)를 갖는 증류수와 혼합 용액 #5에 대해서 CRTM과 MRTM으로 측정된 내부 온도

Table 2. At the frequency of 1.75 GHz, the subcutaneous temperatures measured by CRTM and MRTM for distilled water and the mixed liquid #5 with different thickness (h) at the temperature of 37°C.

	증류수		혼합 용액 #5	
	h=29.5 cm	h=9.5 cm	h=9.5 cm	h=29.5 cm
CRTM	39.06±0.06	37.00±0.06	44.68±0.06	37.82±0.06
MRTM	37.00±0.07	37.00±0.07	37.00±0.07	37.00±0.07

CRTM과 MRTM에 의해 측정된 온도의 평균과 표준편차는 표 2와 같다.

표 2에서와 같이, 37°C에서 두께 h=29.5 cm와 h=9.5 cm의 증류수와 혼합 용액 #5에 대해서, CRTM은 그림 4와 같이 단일 온도 변환표를 갖기 때문에 약 2.06°C, 0.82°C, 7.68°C의 측정 오차를 보여준다.

CRTM과 MRTM의 측정 오차를 고려하기 위해서, CRTM의 측정 오차 $E_{CRTM}(t, h)$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$E_{CRTM}(t, h) = E_P(t, h) + E_{\Delta P_m}(t) \quad (3)$$

$$E_P(t, h) = \frac{P_m(t, h) - P_r(t)}{P_r'(t)} \quad (4)$$

$$P_r'(t) = \frac{dP_r(t)}{dt} \quad (5)$$

$$E_{\Delta P_m}(t) = \frac{\Delta P_m(t)}{P_r'(t)} \quad (6)$$

여기서, t와 h는 각각 매질의 온도와 두께의 변수이다. $E_P(t, h)$ 와 $E_{\Delta P_m}(t)$ 는 각각 온도 변환표와 $\Delta P_m(t)$ 에 의해 발생하는 오차이다. $\Delta P_m(t)$ 는 CRTM 또는 MRTM의 측정된 상대 방사 전력의 변화량이다. $P_m(t, h)$ 와 $P_r(t)$ 는 캘리브레이션에서 각각 측정 대상 매질의 상대적인 방사 전력, 온도 변환표를 만들기 위한 측정의 상대적인 방사 전력을 나타낸다.

MRTM는 그림 5와 같이 다중 온도 변환표를 사용하고 매질 특성 추정기로 매질 특성을 추정하기 때문에 내부 온도 측정에서 발생하는 오차를 줄일 수 있다. MRTM에 의한 측정 오차 $E_{MRTM}(t)$ 는 다음 식으로 정의될 수 있다.

$$E_{MRTM}(t) = E_{\Delta D_m}(t) + E_{\Delta P_m}(t) \quad (7)$$

$$E_{\Delta D_m}(t) = \left\{ \Delta D_m(t) \frac{dP_r(t)}{dD_r} \right\} / P_r'(t) \quad (8)$$

여기서, $E_{\Delta D_m}(t)$ 는 측정된 유전율의 변화율 $\Delta D_m(t)$ 에 의해 발생하는 오차이다. MRTM은 37°C 온도의 증류수와 혼합 용액 #5에 대하여 유전율의 측정 변화율에 의해 발생하는 오차를 갖는다. 본 실험에서 $E_P(t, h)$ 는 약 7.68°C까지이며, $E_{\Delta P_m}(t)$ 는 약 ±0.06°C이고, $E_{\Delta D_m}(t)$ 는 약 ±0.01이다. 측정 오차 중 $E_P(t, h)$ 는 $E_{\Delta P_m}(t)$ 와 $E_{\Delta D_m}(t)$ 에 비하여 크다. MRTM은 37°C에서 두께 29.5 cm와 9.5 cm의 두께를 갖는 증류수와 혼합 용액 #5에 대하여 약 0.82°C~7.68°C의 측정 오차를 크게 줄일 수 있었다. 이는 그림 5와 같이 매질 특성 추정기와 다중 온도 변환표를 사용하기 때문에 가능하다.

유전체 특성 중 어느 것이 측정 오차에 주된 효과를 주는지를 알아보기 위해서, 유전율은 거의 고정시키고 도전율은 다양하게 변화시켜 가면서 방사 전력을 RT-17로 측정하였다. 30°C에서 유전율과 도전율이 각각 76.84, 75.50, 6.59 S/m, 21.71 S/m인 두 매질에 대해서, 방사 전력은 모두 상대 전력인 73로 같게 나왔다. 이 실험 결과는 도전율이 서로 다른 유전체 특성을 갖는 매질에 대해서 오차를 발생시키는 주된 요소가 아님을 보여준다.

생체에 MRTM을 적용할 때, 그 생체는 균일한 특성이 아닐 수 있지만, 생체의 몇몇 부분은 지방과 같은 균일한 조직으로 모델링될 수 있다. 균일한 조직에 대해서는 성공적인 임상 평가를 보여 주었다^[6] (<http://www.resltd.ru>). 조직의 균일성은 라디오-써모미터가 내부 온도 측정에서 정확도를 높일 수 있도록 한다. 마이크로파 라디오-써모미터는 균일한 볼륨으로 모델링될 수 있는 조직에서 종양을 조기 검출하기 위한 대량 진단에 더욱 유용할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 다양한 유전체 특성과 두께를 갖는 매질에 대해서 생체의 내부 온도의 측정에서 CRTM의 측정 오차를 논하였다. 그리고, 이들 오차를 줄이기 위해서 수정된 마이크로파 라디오-써모미터(MRTM)를 제안하였다. 실험에서 37°C의 온도에서 29.5 cm와 9.5 cm

의 두께를 갖는 증류수와 혼합 용액 #5에 대해서, MRTM은 매질 특성 추정기와 다중 온도 변환표를 갖고 서로 다른 유전체 특성과 두께의 매질에 대해서 보상함으로써 0.82°C~7.68°C까지의 측정 오차를 줄일 수 있었다.

참고 문헌

[1] Fawwaz T. Ulaby, Richard K. Moore, and Adrian K. Fung, Microwave remote sensing, active and passive: Volume I. Microwave remote sensing fundamentals and radiometry, *Artech House*, pp.344-429, 1981.

[2] A. H. Barrett, P. C. Myers, N. L. Sadowsky, "Detection of breast cancer by microwave radiometry", *Radioscience*, 12, pp.167-171, 1977.

[3] Y.Leroy, "Microwave radiometry and thermography: present and prospective", *Biomedical Thermology*, pp.485-499, 1982.

[4] Shizuo Mizushima, Hiroyuki Ohba, Katsumi Abe, Shinya Mizoshiri, and Toshifumi Sugiura, "Recent Trends in Medical Microwave Radiometry", *IEICE Trans. Commun.*, VolE78-B, No.6, pp. 789-798, 1995.

[5] Yves Leroy, Bertrand Bocquet and Ahmed Mamouni, "Topical Review: Non-invasive microwave radiometry thermometry", *Physiol. Meas.*, 19, pp.127-148, 1998.

[6] Gautherie M, Mamouni A, Samsel M, Guerquin-Kern J L, Leroy Y and Gros Ch, "Microwave radiothermometry (9 GHz) applied to breast cancer", *J. Opt. Photon. Appl. Med.*, 2, pp.154-160, 1980.

[7] Robert J, Edrich J, Mamouni A, Escanye J M and Itty C, "Microwave thermometry in intracranial pathology", *Medical Thermology (New York: Lyss)*, pp.501-508, 1982.

[8] A.M. Campbell and D.V. Land, "Dielectric Properties of Female Human Breast Tissue Measured in vivo at 3.2 GHz", *Phys. Med. Biol.*, Vol.37, No.1, pp.193-210, 1992.

[9] F. Bardati, V. J. Brown, and P. Tognolatti, "Temperature reconstructions in a dielectric cylinder by multi-frequency microwave radiometry", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 7, No. 11, pp. 1549-1571, 1993.

[10] Dubois, L., Pribetich, J., Fabre, J. J., Chive, M. and Moschetto, Y., "Non-invasive microwave multifrequency radiometry used in microwave hyperthermia for bidimensional reconstruction of temperature patterns", *International Journal of Hyperthermia*, vol. 9, no. 3, pp.415-431, 1993.

[11] S. Mizushima, T. Shimizu, K. Suzuki, M. Kinomura, H. Ohba, and T. Sugiura, "Retrieval of Temperature-Depth Profile in Biological Objects from Multi-Frequency Microwave Radiometric Data", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 7, No. 11, pp. 1515-1548, 1993.

저자 소개



김태우(평생회원)
 1990년 한양대학교 전자통신 공학과 학사 졸업.
 1992년 한양대학교 전자통신 공학과 석사 졸업.
 1995년 한양대학교 전자통신 공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 영상처리, 생체신호처리>



조태경(평생회원)
 1984년 한양대학교 전자통신 공학과 학사 졸업.
 1986년 한양대학교 전자통신 공학과 석사 졸업.
 2001년 한양대학교 전자통신 공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 초고속정보통신망, e-Learning>



박병수(정회원)
 1986년 한양대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1989년 한양대학교 전자공학과 석사 졸업.
 1994년 텍사스 A&M 박사 졸업.

<주관심분야 : 임베디드 시스템>