

## 의료용 적외선 영상장치의 구현

이 수열\*, 우응제\*, 조민형\*\*, 송형빈\*\*\*

\* 건국대학교 의공학과, \*\* 수원대학교 전기공학과, \*\*\* 도남시스템 주식회사

### Development of Medical Infrared Imaging System

Soo Yeol Lee\*, Eung Je Woo\*, Min Hyung Cho\*\*, Hyung Bin Song\*\*\*

\* Dept. of Biomedical Eng., Konkuk University

\*\* Dept. of Electric Eng., Suwon University

\*\*\* Donam systems, Inc.

#### Abstract

With proper designs of infrared optic system and two dimensional scanning mechanism, a medical infrared imaging system has been developed. The infrared imaging system can be used for two dimensional imaging of surface temperature of human body by measuring the amount of infrared lights radiating from it. It has been experimentally proven that the degree of temperature measurement accuracy of the developed system is under 0.1°C with spatial resolution of 1 mrad, image matrix size of 256x240, and imaging time of 4 seconds.

#### 서론

인체표피상의 체온분포는 표피하 세포조직내의 혈류순환등에 대한 정보를 내포하고 있어 표피온도를 2차원적으로 측정하는 기술은 의학적으로 그 중요성이 인정되고 있다<sup>1)2)</sup>. 종래에는 온도에 따라 반응하는 물질을 인체표피에 접촉하여 온도분포를 영상화 하는 체열측정기술(Thermography)이 사용되었으나, 최근에는 적외선 응용기술이 발달하게 됨에 따라 인체에서 복사되는 적외선을 인체의 표피를 접촉하지 않고 감지하여 표피온도 분포를 영상화해 주는 적외선 영상장치가 개발되어 그 임상적 응용이 확산되어 가고 있다. 특히 한방의학이 상당한 비중을 차지하고 있는 우리나라의 경우 인체의 온도분포를 중요시하는 한방의학 분야에서의 임상적 응용도 크게 증가할 것으로 보인다.

본 논문에서는 의료용으로 사용할 수 있는 적외선 영상장치의 개발을 위해 적외선 광학계의 설계 및 주사 장치의 설계에 대한 이론적인 고찰을 하였고, 제작한 적외선 영상장치의 성능에 관한 실험적 분석 결과를 촬영한 영상과 함께 제시하였다.

#### 적외선 영상장치의 구성

##### 적외선의 복사

절대온도가 T°K인 흑체(Blackbody)에서 복사되는 전자파의 파장별 분포는 아래의 Planck 함수로 주어진다.

$$\frac{dL_B}{d\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(C_2/\lambda T)} - 1} \quad [W/m^2 sr] \quad (1)$$

여기서  $L_B$ 는 파장에 대한 복사파의 에너지분포 함수,  $\lambda$ 는 복사파의 파장, T는 흑체의 절대온도, sr는 입체각의 단위이고, 상수  $C_1$  및  $C_2$ 는 각각  $C_1 = 1.176 \times 10^{16} Wm^2$ ,  $C_2 = 1.432 \times 10^2 mK$ 이다<sup>3)4)</sup>.

또한 흑체에서 방사되는 전자파에너지의 총량은 Stefan-Boltzmann 법칙에 의해 아래와 같이 절대온도 T의 4제곱에 비례한다.

$$W = \sigma T^4 \quad (2)$$

여기서 W는 복사파의 전체 에너지 양,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ 이다.

따라서 인체에서 복사되는 전자파의 양을 계속한다면 윗 식으로부터 표피온도를 추출할 수 있다. 인체의 체온은 약 37°C 부근이므로 인체에서 복사되는 전자파의 대부분의 에너지는 파장이 10 $\mu$ m 근처의 원적외선 대역에 분포하고 있다.

##### 적외선 영상장치의 구성

본 연구에서 시험제작한 적외선 영상장치의

구성도를 그림 1에 나타내었다. 적외선 영상장치는 인체에서 복사되는 적외선을 집속하여 적외선 센서면에 상을 맺게하여 전기적인 신호로 변환하여 주는 적외선카메라부, 적외선 영상신호를 처리하고 도시해 주는 컴퓨터부, 적외선 영상 도시를 위한 모니터, 그리고 적외선 영상의 Hard copy를 위한 Color video printer로 이루어져 있다. 적외선 카메라부는 적외선을 집속하여 상을 맺게 하는 집속광학부, 초점거리를 조절해 주기 위한 Focusing 부, 2차원 주사를 위한 광주사부, 적외선센서 및 주변회로부, 그리고 적외선카메라를 제어하고 신호를 수집하는 제어 회로 등으로 구성되어 있다.

**적외선센서의 선택**

본 연구에서 선택한 적외선센서는 10 $\mu$ m의 파장대역에서 가장 감지능력이 탁월한 Photoconductive형의 MCT(Mercury-Cadmium-Telluride; HgCdTe)소자로 액체 질소로 냉각하여 사용하였다. 사용한 센서의 감지도(Detectivity) D\*는 60°의 FOV, 10KHz의 동작상태에서 액체온도로 냉각하여 사용할 시 (77°K) 약 4.0X10<sup>10</sup> cmHz<sup>1/2</sup>/W이고, 감지도가 가장 좋은 대역은 10 $\mu$ m 대역이며 차단파장(Cut-off wavelength)은 약 11.5 $\mu$ m이다. 사용한 적외선센서의 특성곡선을 그림2에 나타내었다. 적외선 감지소자의 창(window)은 무반사 코팅이 된 Ge 소재를 사용하여 창의 투과율을 약 90% 이상으로 하였으며 센서의 Cold shield를 이용한 FOV(Field Of View)는 30°로 하였다. 그리고 적외선 센서의 유효면적(Active area)은 300 $\mu$ m $\times$ 300 $\mu$ m로 하였으며 모양은 정사각형으로 하였다.

**적외선 광학계의 설계**

인체에서 복사되는 적외선을 집속하여 센서면에 상을 맺히게 하는 집속광학계는 반사를 이용하는 거울을 사용하여 실현하였다. 거울은 굴절을 이용하는 렌즈에 비하여 적외선의 사용 효율(Throughput)은 나쁘지만 아래의 장점이 있다.

- . 광학재료의 값이 상대적으로 매우 저렴하다.
- . Coating이 용이하다.
- . 색수차가 없다.
- . 온도에 대한 광학특성의 편차가 매우 적다.

집속광학계를 포함한 전체 광학시스템의 개념도를 그림3에 나타내었다. 거울의 Substrate재료는 Pyrex를 사용하였으며 표면은 알루미늄으로 coating을

하였다. 구면경의 초점거리는 18 cm로 설계하였으며 구면경의 직경은 8cm이다. 구면경으로 집속된 적외선의 방향을 90° 바꾸어 적외선 센서면으로 향하게 하기 위하여 타원형 형태의 반사경을 적외선 센서 아래에 배치하였다.

적외선의 주사는 2면을 가진 평면경을 구면경과 대상물체 사이에 두고 이를 수직 및 수평 방향으로 정속 회전시킴으로써 실현하였다. 그림3의 평면경을 점O를 중심으로 수평 및 수직 방향으로 각기  $\alpha'$ ,  $\beta'$ 만큼 회전시키면 적외선의 수평 및 수직방향으로의 주사각도  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 아래의 식으로 표현된다.

$$\alpha(\alpha',\beta') = \sin^{-1}(\sin[2\alpha']/\cos\beta') \approx 2\alpha' \quad (3-a)$$

$$\beta(\alpha',\beta') = -\sin^{-1}(\cos[2\alpha']\sin\beta') \approx \beta' \quad (3-b)$$

식 3에서의 근사치는  $\alpha'$ 가 작을 때 성립한다.

수평방향으로는 AC 유도모터를 Inverter로 구동하여 한쪽방향으로 정속회전을 시켰는데, 회전속도를 일정하게 하기 위하여 AC 모터 축에 위치결정판(Position encoder)을 장착하고 속도정보를 추출하여 유도모터에 인가되는 전원의 주파수를 미세조정함으로써 실현하였다. 수평방향으로의 촬영각도는 24°인데 이 각도만큼의 주사를 위해서는 평면경을 12°만큼 회전하면 된다. 따라서 이와 같은 방식의 주사방식을 채택하면 주사효율은 12/180 = 6.7%가 된다.

수직방향의 주사는 수평방향으로 회전을 하고 있는 평면경을 그림3에서의 점 O를 중심으로 하여 등각속도로 움직이게 함으로써 실현하였다. 수직방향으로의 촬영각도는 24°로, 이 각도만큼 주사하기 위해서는 평면경을 수직방향으로 24°만큼 회전시켜야 한다. 수직방향의 주사는 평면경을 사각형 모양의 Gimbals에 장착하여 이 Gimbals를 캠(Cam)을 이용하여 왕복 등속각운동을 하게 함으로써 실현하였다. 캠의 회전은 Stepping motor로 제어하였다.

수평 및 수직방향으로의 주사선수는 각기 256과 240으로 하였는데 이는 VGA의 화소수 640 $\times$ 480를 고려한 것이다.

촬영거리에 따른 초점조정은 구면경을 수평이동함으로써 실현할 수 있다. 본 연구에서는 구면경 지지대를 Ball screw에 장착하여 stepping motor로 구동함으로써 0.1mm의 정확도로 초점을 조절할 수 있었다.

적외선 영상장치의 온도분해능(NETD : Noise Equivalent Temperature Difference)을 나타내는 식은 아래와 같다<sup>9)</sup>.

$$NETD = \frac{4(F\#)^2(\Delta f)^{1/2}}{(A_d)^{1/2}\tau_o D^* \Delta W/\Delta T} \quad [^{\circ}K] \quad (4)$$

여기서

$\tau_o$  : 광학계의 transmittance

- D\* : 적외선 센서의 Special detectivity
- F# : 구면경의 F-number
- $\Delta f$  : 적외선 신호의 대역폭
- $A_s$  : 적외선 센서의 면적
- $\Delta W/\Delta T$  : 온도변화 대비 적외선 복사량의 변화량

이다.

본 설계에서는  $\tau_s = 0.962$  (0.987의 반사도를 가진 거울면이 3개),  $D^* = 4 \times 10^{10}$ ,  $F\# = 2.25$ ,  $\Delta f = 181 \text{ KHz}$ ,  $\Delta W/\Delta T = 1.48 \times 10^4$ 를 대입하면 NETD는 약  $0.067^\circ \text{K}$ 가 된다.

광학계의 공간분해능은 일반적으로 각해상도로 표현된다. 본 연구에서 실현한 광학계는 주사를 하는 동안 센서가 바라보는 대상물체가 항상 광축상에 놓이므로 Coma, Astigmatism과 같은 off-axis 수차는 사라지게 된다. 따라서 구면수차만 남게 되는데 이 경우 구면수차에 의한 각해상도의 열화는 아래의 식으로 표현된다.

$$\beta = 1/128(F\#)^3 \quad [\text{rad}] \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 각해상도를, 그리고  $F\#$ 는 구면경의 F-number를 가리킨다. 본 시스템의  $F\#$ 는 2.25이므로 각해상도는  $0.69 \text{ mrad}$ 이 된다.

### 적외선카메라 controller의 설계

적외선 카메라의 각종 모터 제어, 적외선신호의 수집 및 PC와의 interface를 위한 controller로 16bit  $\mu$ -processor를 사용하였다. 적외선신호의 A/D변환 bit-depth는 10bit이며 sampling time은  $4\mu\text{sec}$ 이다.

### 영상도시부 및 기록부

영상의 도시는 VGA 도시방식의 PC를 이용하였으며 시각적으로 온도차이를 쉽게 알 수 있도록 16 혹은 256컬러로 Pseudo-coloring을 하였다. 그리고 기록은 천연색 재현이 가능한 열전사방식의 Color video printer를 사용하였다.

### 실험결과 및 토의

본 연구에서 개발한 적외선 영상장치를 사용하여 온도분해능 및 공간분해능을 측정하였다. 온도분해능은 미세 온도조정이 가능한 원추형 흑체에 대한 영상을

개발한 장치로 얻으면서 구별이 가능한 온도의 최소치를 구하는 방식으로 측정하였다. 그 결과 약  $0.1^\circ \text{C}$ 의 온도분해능을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 의학적으로 의미를 갖는 온도차가 약  $0.3^\circ \text{C}$  이상인 것을 감안하면 구현된 온도분해능은 의학적으로 적용가능한 수준이라고 생각된다. 공간분해능은 미세한 Pattern이 새겨진 알루미늄 판을  $35^\circ \text{C}$ 내외로 가열된 수조 앞에 세우고 이를 영상화하여 공간적으로 구별가능한 Pattern의 최소 크기를 구하고 적외선카메라와 알루미늄 판 사이의 거리를 측정하여 각해상도를 구했다. 그 결과 공간해상도는 각해상도(Angular resolution)로 표현할 때 약  $1 \text{ mrad}$  ( $10^{-3} \text{ rad}$ )임을 확인할 수 있었다. 인체의 체온 분포는 공간적으로 매우 천천히 변하므로 이 정도의 공간분해능이면 인체 표피상의 어떠한 미세한 온도 분포도 탐지할 수 있으리라고 생각된다.

본 연구에서 제작한 적외선 영상장치로 얻은 인체 영상을 그림4에 예시하였다. 그림4의 윗편 왼쪽부터 시계방향으로 각기 인체의 손, 머리, 흉부, 그리고 다리 부분을 촬영한 영상을 예시하였다. 온도분포는 시각적으로 구별이 보다 쉽게 되도록 하기 위해 16가지 색으로 Pseudo-coloring을 하였다.

### 결론

본 연구에서 개발한 적외선 영상장치는 값이 저렴한 단일소자형 적외선 센서 및 거울로 구성된 적외선 광학부를 사용하였지만  $0.1^\circ \text{C}$ 의 온도분해능 및  $1 \text{ mrad}$ 의 공간분해능 등 뛰어난 성능을 가지고 있어 의료용으로 충분히 사용될 수 있으리라 사료된다. 의료용 적외선 영상장치는 산업용과는 달리 촬영시간에 제약이 적은 반면 온도분해능은 우수해야 하는데 산업용에서와 같이 고가의 Array 센서를 사용하는 것보다는 단일소자형 센서를 사용하면서 광주사방식을 채택하는 것이 보다 경제적인 것으로 생각된다.

향후 개발된 적외선 영상장치로 통증관련 Clinic, 신경과, 그리고 한방의학분야 등에서 임상시험을 계속할 예정으로 있다.

### 참고문헌

1. Frieda Feldman, "Thermography of the hand and wrist : Practical applications," Hand Clinics, Vol.7, No.1, p. 99, 1991
2. Sumio Uematsu, et al., "Quantification of thermal asymmetry," J. of Neurosurg., Vol. 69, p. 552, 1988
3. K.D. Moller, "Optics," University Science Books, Mill

Valley, California, p.436, 1988

4. George J. Zissis, "The Infrared Handbook," 3rd Ed., Infrared Information Analysis Center, p11-1, 1989

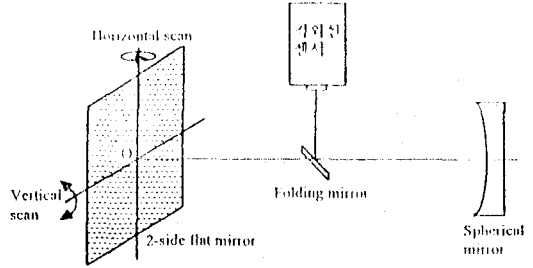


그림 3 적외선 카메라의 구성도

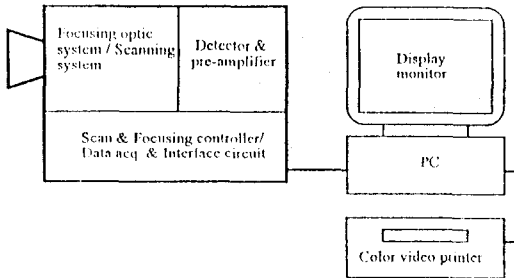


그림 1 적외선 영상장치의 구성도

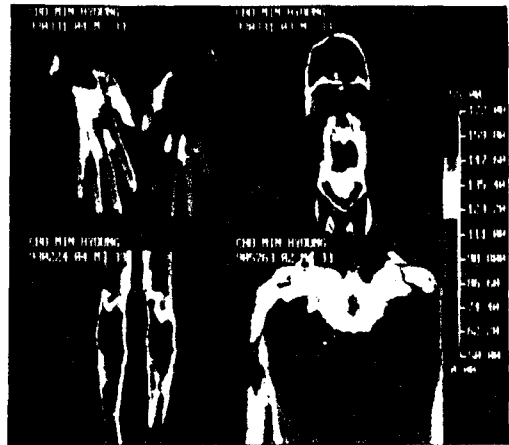


그림 4 적외선 영상장치로 얻은 인체 각부위의 적외선 영상. 윗편 왼쪽 부터 시계방향으로 손, 머리, 흉부, 다리부분의 영상.

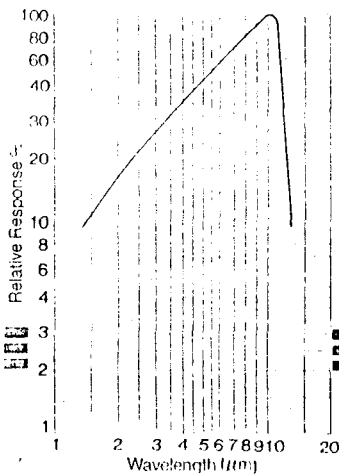


그림 2 적외선센서의 특성곡선