

# Silver Halide 광섬유를 이용한 의료용 비접촉식 온도 센서 개발

유옥재, 조동현, 장경원, 정순철, 탁계래, 이봉수

건국대학교 의료생명대학 의공학부, 의공학 실용기술 연구소

(Received October 9, 2006. November 16, 2006)

## Development of Noncontact Temperature Sensor Using Silver Halide Optical Fiber for Medical Usages

Wook Jae Yoo, Dong Hyun Cho, Kyoung Won Jang, Soon-cheol Chung, Gye-Rae Tack, Bongsoo Lee

School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science  
Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University

### Abstract

We have developed a noncontact temperature sensor using a silver halide optical fiber. The infrared collimator and focus head are connected both ends of a silver halide optical fiber with SMA connectors and used to collimate radiations of a heat source and to focus them to infrared sensors such as a pyroelectric sensor and a thermopile sensor, respectively. The relationships between the temperatures of a heat source and the output signals of the infrared sensors are determined to measure the surface temperature of a heat source. The measurable temperature range is from 25 to 60 °C. It is expected that a noncontact temperature sensor using a silver halide optical fiber can be developed for medical usages such as temperature monitoring during hyperthermia, cryosurgery, laser surgery and diagnostic procedure based on the results of this study

Key words : silver halide optical fiber, noncontact temperature sensor, infrared radiation

### 1. 서 론

**비**접촉식 온도 측정 장치는 열원에서 방출되는 적외선을 검출함으로써 열원의 표면온도를 측정하는 장치이다. 하지만 기존의 일반 비접촉식 온도 측정 장치는 열원 내부에 삽입하여 온도를 측정할 경우에 제약이 따르게 되는 반면, 적외선 투과 광섬유를 이용한 비접촉식 온도 측정 장치는 온도 측정을 하기 힘든 좁은 곳이나 움직이는 물체, 강한 전자기장에서도 열원의 표면 온도를 비접촉으로 측정할 수 있으며 저온의 물체 내부에 적외선 광섬유를 삽입하여 온도를 측정할 수 있는 장점을 가진다[1, 2].

실온에 가까운 저온의 물체가 방출하는 복사에너지의 최대 파장은 중-원적외선 영역이므로 일반 실리카 (silica) 광섬유로는 저온의 온도 측정이 불가능하다. 적외선 투과 광섬유의 중요한 특성은 일반 광섬유가 전송하지 못하는 긴 파장 영역의 빛을 전송시키는 것으로 일반 실리카 광섬유가 0.24~2.0 μm 의 전송 파장 영역

을 가지는 반면, 적외선 투과 광섬유는 2 μm 이상의 적외선 파장을 전송시킬 수 있다.

적외선 투과 광섬유를 이용한 온도 측정에는 긴 파장을 전송시킬 수 있는 silver halide 또는 hollow waveguides 광섬유가 필요하며, 이를 이용하여 넓은 온도범위에서 온도를 측정할 수 있다 [3]. 4~16 μm 의 전송 파장 영역을 가지는 silver halide 광섬유에서 AgCl<sub>x</sub>Br<sub>1-x</sub> 광섬유는 비교적 낮은 온도에서의 적외선 전송을 위해 사용되고 인간의 체온을 약 37°C 로 볼 때, 인체에서 방출되는 적외선 복사에너지의 최대파장은 약 9.35 μm 이므로 silver halide 광섬유를 이용하여 전송시킬 수 있다. 또한 silver halide 광섬유는 유연하고 불용해성이며, 무독성이므로 의료계에서 적외선 복사 측정기 (radiometry), 적외선 열 영상 (thermal imaging) 그리고 열을 이용한 수술 및 치료분야에 적용 가능하다[4, 5, 6]. 특히, 온열치료 (hyperthermia)는 암 부위의 온도를 세포 치사온도인 42.5~43.0 °C 로 가열하여 암을 치료하는 방법으로 이 때, 암 세포 주변의 정상 세포 역시 영향을 받아 괴사하게 되므로, 가열 부위의 온도 분포를 정확하게 측정하는 것이 중요하며 세포 치사 온도인 42.5 °C 의 적외선 복사에너지의 최대파장은 9.18 μm 이므로 silver halide 광섬유를 이용하여 전송시킬 수 있다[7, 8]. 또한 silver halide 광섬유를 내시경에 포함시켜 인체 내부에 삽입함으

본 연구는 한국과학재단 특장기초연구(R01-2006-000-11131-0) 지원으로 수행되었음.

Corresponding Author : 이봉수

충북 충주시 단월동 322 건국대학교 의료생명대학 의공학부

Tel : 043-840-3755 / Fax : 043-851-0620

E-mail : bslee@kku.ac.kr

로써 장기 및 치료 부위의 온도 분포 측정이 가능하고, 저온수술 (cryosurgery)과 레이저를 이용한 최소 침습적 수술 (minimal invasive surgery)에서도 온도 측정이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 인체 내부 온도 측정을 목적으로 하는 기초연구로서 인체 내부 온도에 가까운 저온의 물체를 열원으로 하여 열원에서 방출되는 적외선을 silver halide 광섬유를 통해 전송시켜 열원의 온도 변화에 따른 적외선 센서의 출력신호를 측정하였고, 열원의 온도와 적외선 센서 출력신호 사이의 관계식을 도출하였다.

II. 실험방법

본 연구에 사용된 광섬유는 silver halide 광섬유 (PIR 900/1000, JT Ingram Co.)로서 자켓 (jacket)을 포함한 광섬유의 외경이 1.3 mm, 코어 (core)의 직경은 0.9 mm 이며 클래딩 (cladding)의 두께는 0.05 mm이다. 코어의 굴절율은 2.15이고, 개구수 (numerical aperture)는 0.25이며 녹는점은 415 °C 이다. 적외선 전송 파장범위는 중적외선 영역인 4~18 μm 이고, 매우 유연한 기계적 성질을 갖는다.

그림 1은 실험에 사용된 silver halide 광섬유의 파장에 따른 전송률을 보여주고 있으며, 10~14 μm 영역의 적외선 파장에서 90 % 이상의 전송률을 보이고 있다.

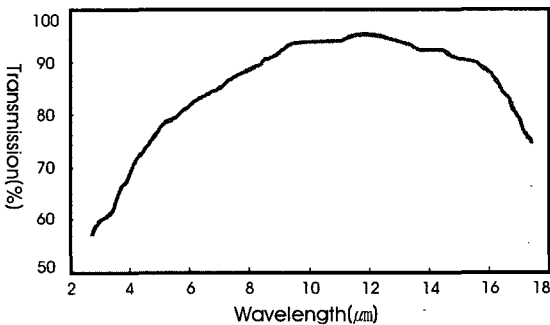
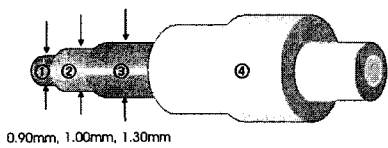


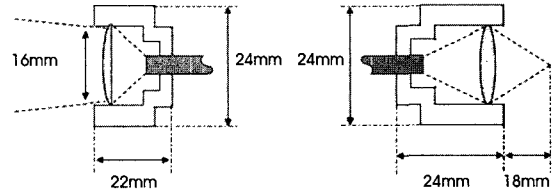
그림 1. Silver halide 광섬유의 파장에 따른 전송률  
Fig. 1. Transmission rate of a silver halide optical fiber



- ① Core : Mixed Silver Halide(AgCl<sub>x</sub>Br<sub>1-x</sub>), n=2.15
- ② Clad : Mixed Silver Halide(AgCl<sub>x</sub>Br<sub>1-x</sub>), n=2.13
- ③ Jacket : PEEK-Polymer(Polyetheretherketone)
- ④ SMA connector

그림 2. Silver halide 광섬유의 구조  
Fig. 2. Structure of a silver halide optical fiber

그림 2는 Silver halide 광섬유의 구조를 보여준다. 코어와 클래딩은 silver halide인 AgCl:AgBr 혼합물질이고, 자켓은 PEEK-polymer (polyetheretherketone)로 구성되어 있으며, 광섬유의 양 끝단은 SMA 커넥터로 연결되어있다.



Infrared fiber optic collimator    Infrared fiber optic focus head

그림 3. 적외선 광학 장비의 구조  
Fig. 3. Schematic diagrams of infrared optical devices

그림 3은 적외선 광학 장비인 collimator와 focus head의 구조를 보여주고 있으며, 적외선 광학 장비는 silver halide 광섬유 양 끝단에 연결된 SMA 커넥터에 연결하여 사용된다. 본 연구에 사용된 collimator (FOCIR 10, JT Ingram Co.)는 열원으로부터 방출된 적외선을 평행하게 하여 silver halide 광섬유 끝단에 적외선의 양을 증가시키는 역할을 하고, focus head (FOFHIR 10, JT Ingram Co.)는 silver halide 광섬유로부터 전송된 적외선을 적외선 센서에 집광시키는 역할을 한다.

본 연구에 사용된 열원은 열 방출형 적외선 광원 (IR-12K, Scitec Ltd.)으로서 방출면적 (active area)은 3.5 mm × 3.5 mm이며, 1~22 μm 영역의 적외선 파장에서 80 %의 방사율 (emissivity)을 보이고 있다. 열원의 온도는 인가 전압에 의해서 변화되고, 각각의 열원 온도에 의해서 방출되는 적외선의 파장이 결정된다. 열원으로부터 방출된 적외선은 silver halide 광섬유를 통해서 적외선 센서로 전송되고, 전송된 적외선의 특정 파장에 대해서 적외선 센서의 출력이 결정된다. 이 때 silver halide 광섬유의 적외선 전송량을 증가시키고, 실온에서 적외선 검출기의 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio)를 높이기 위하여 적외선 광학 장비를 사용하였다.

적외선 투과 광섬유를 이용한 온도측정에서는 열원과 광섬유 간의 거리를 고려해야한다. 열원이 고온인 경우, 광섬유 내부의 상태이상으로 적외선의 전송률이 떨어지거나, 광섬유의 녹는점보다 고온이 될 경우에는 광섬유가 녹게 된다. 실험에서는 silver halide 광섬유의 녹는점과 동작온도 범위를 고려하여 열원과 silver halide 광섬유 간의 거리를 1 cm로 결정하였다.

본 연구에서 모든 실험은 25 °C 실온에서 수행하였고 실온에서 동작 가능한 적외선 센서를 사용하였으며, 반복 실험과 무작위 실험을 통해서 열원의 온도 변화에 따른 적외선 센서의 출력신호를 측정하였고, 열원의 온도와 적외선 출력신호 사이의 관계식을 도출하였다.

### III. 적외선 검출 시스템을 이용한 실험구성 및 결과

적외선 검출 시스템 (infrared radiometer system)은 초전형 적외선 센서 (pyroelectric sensor), 초퍼 (chopper) 그리고 lock-in amplifier로 구성된다. 초전형 적외선 센서 (LTSI Q1, Scitec Ltd.)의 감지 파장 범위는 37 °C의 인체에서 방출되는 적외선 파장인 9.35 μm 를 포함하는 8~14 μm 이다. 그림 4는 초전형 적외선 센서에 사용된 필터의 파장에 따른 투과율을 보여주고 있다.

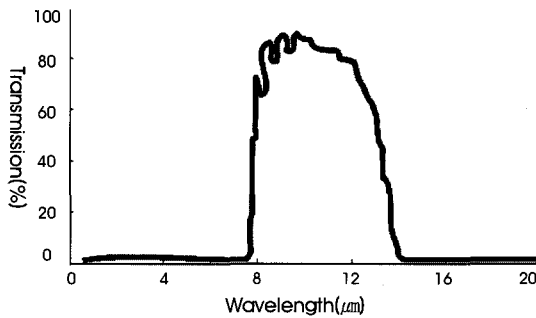


그림 4. 초전형 적외선 센서에 사용된 필터의 파장에 따른 투과율  
 Fig. 4. Transmission of the infrared optical filter of a pyroelectric sensor

초전형 적외선 센서는 열형 센서 (thermal sensor)로서 광전효과형 센서 (photovoltaic sensor)보다 감도가 낮은 단점이 있지만 실온에서 작동하며 파장의존성이 작은 장점을 가지고 있다. 초전형 적외선 센서는 감지부 (sensing element)에 입사된 적외선의 변화가 없을 시에는 추가적인 출력을 얻을 수 없게 된다. 실험에서는 적외선 검출 시스템에 초퍼 (300CD, Scitec Ltd.)를 사용하여 주기적인 적외선의 입사가 가능하게 하였으며, 초퍼의 주파수는 초전형 적외선 센서의 감도를 높이기 위하여 1 Hz 로 하였다. 또한 초전형 적외선 센서의 잡음 (noise)이 섞여 있는 출력신호를 받아 원하는 신호만 따로 검출하기 위하여 lock-in amplifier (420 dual phase, Scitec Ltd.)를 사용하였다. 그림 5는 초퍼의 주파수에 따른 초전형 적외선 센서의 검출능 (detectivity)을 보여준다.

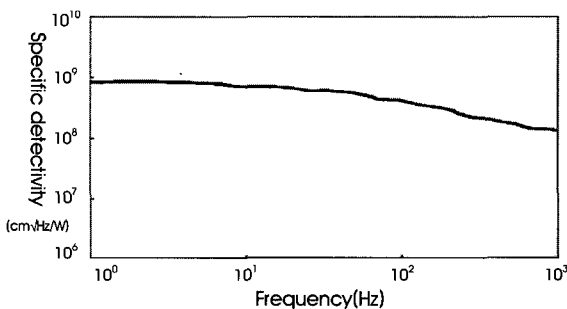


그림 5. 초퍼의 주파수와 초전형 적외선 센서의 검출능의 관계  
 Fig. 5. Relationship between the chopping frequency and the detectivity of a pyroelectric sensor

그림 6은 silver halide 광섬유와 적외선 검출 시스템을 이용한 실험구성을 보여주고 있다. 열원, 적외선 광학장비 및 silver halide 광섬유 그리고 초전형 적외선 센서를 일직선상에 위치시키고, 열원과 초전형 적외선 센서 및 silver halide 광섬유 양 끝단은 주위 광원의 영향을 최소화하기 위해서 암실처리를 하였다. 적외선 검출 시스템의 출력신호 측정을 위한 열원의 온도 범위는 25~60 °C 이다.

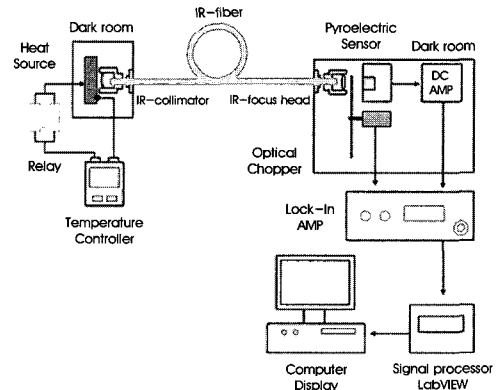


그림 6. silver halide 광섬유와 적외선 광학장비 그리고 적외선 검출 시스템을 이용한 온도 측정 실험구성

Fig. 6. Experimental setup for measuring temperature using a silver halide optical fiber, infrared optical devices and an infrared radiometer system

초전형 적외선 센서를 이용한 적외선 검출 실험에서 적외선 광학 장비를 사용하기 전에 silver halide 광섬유만을 사용하여 열원의 온도변화에 따른 적외선 검출 시스템의 출력신호를 측정하였다. 그림 7은 적외선 광학 장비를 사용하지 않은 경우, 열원의 온도 변화에 따른 적외선 검출 시스템의 출력신호를 보여준다.

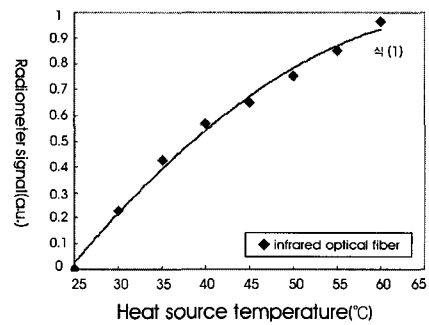


그림 7. 적외선 광학 장비를 사용하지 않은 경우, 열원의 온도와 적외선 검출 시스템의 출력신호 사이의 관계

Fig. 7. Relationship between the temperatures of a heat source and the measured radiometer signals without infrared optical devices

식 (1)은 적외선 광학 장비를 사용하지 않은 경우, 열원의 온도 (x)와 적외선 검출 시스템의 출력신호 (y) 사이의 관계식을 보여

주고 있으며, 그 정확도는 99.33 % 이다.

$$y = -0.0004x^2 + 0.0625x - 1.2701 \quad (1)$$

그림 8은 그림 6의 실험구성과 같이 적외선 광학 장비를 사용한 상태에서 열원의 온도변화에 따른 적외선 검출 시스템의 변화를 보여주고 있다.

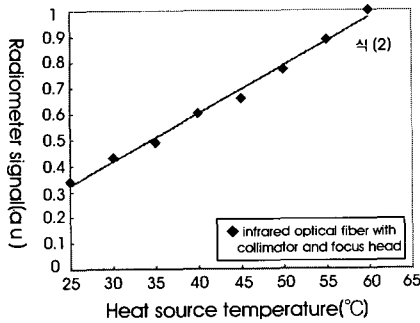


그림 8. 적외선 광학 장비를 사용한 경우, 열원의 온도와 적외선 검출 시스템의 출력신호 사이의 관계

Fig. 8. Relationship between the temperatures of a heat source and the measured radiometer signals with infrared optical devices

식 (2)는 적외선 광학 장비를 사용한 경우, 열원의 온도 (x)와 적외선 검출 시스템의 출력신호 (y) 간의 관계식을 보여주고 있고, 이 경우 관계식과 실험값과의 정확도는 99.14 % 이다.

$$y = 0.0186x - 0.1407 \quad (2)$$

실험결과, 적외선 광학 장비를 사용하였을 경우, 열원의 온도와 적외선 검출 시스템의 출력신호가 선형적인 관계를 가졌다. 위의 결과를 확인하기 위하여 초전형 적외선 센서와 동작원리가 같은 열형 센서인 써모파일 센서 (thermopile sensor)를 사용하여 동일한 조건에서 실험을 수행하였다.

#### IV. 써모파일을 이용한 실험구성 및 결과

적외선 센서로는 실온에서 적외선을 감지할 수 있는 써모파일 센서(A2TPMI334, Perkin Elmer Inc.)를 사용하였고, 센서의 감지 파장 범위는 silver halide 광섬유의 전송 파장 범위를 포함하며, 센서에 사용한 적외선 필터에 따라 바뀌게 된다. 써모파일 센서는 열형 센서로서 실온에서 작동하고 파장 의존성이 적은 장점을 가지며, 초전형 센서에 비해 검출능이 낮은 단점이 있지만 초퍼를 사용할 필요가 없고, 경제적이며 간단하게 실험장치를 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 써모파일 센서에 사용된 적외선 필터는 2종류로서, 5.5~16 μm의 파장 범위를 가지는 기본(standard) 필터는 7.5~13.5

μm 파장의 영역에서 70% 이상의 투과율을 보이고, 2~22 μm의 파장 범위를 가지는 G12 필터는 5.5~13.5 μm 파장의 영역에서 52% 이상의 투과율을 보인다. 그림 9는 써모파일 센서에 사용된 필터의 파장에 따른 투과율을 보여주고 있다.

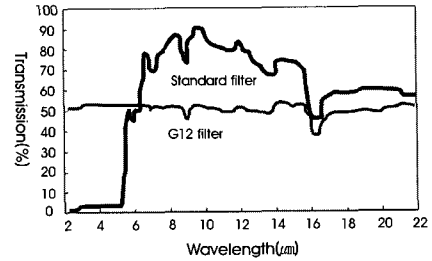


그림 9. 적외선 필터의 투과율

Fig. 9. Transmission rate of the infrared optical filters in the thermopile sensor

그림 10은 silver halide 광섬유와 써모파일 센서를 이용한 실험 구성을 보여주고 있다. 적외선 검출 시스템을 사용한 실험과 동일하게 열원, 적외선 광학 장비 및 silver halide 광섬유 그리고 써모파일 센서를 일직선상에 위치시키고 열원 및 silver halide 광섬유 양 끝단은 주위 광원의 영향을 최소화하기 위해서 암실처리를 하였다. silver halide 광섬유를 통해 전송된 적외선은 써모파일 센서 앞에 위치한 적외선 필터에 의해 감지가능한 적외선 파장영역만 투과되어 센서에 입사되고, 써모파일 센서에서 적외선 신호를 전기 신호로 변환하면, 증폭회로는 미세한 센서의 출력전압을 증폭시키게 된다.

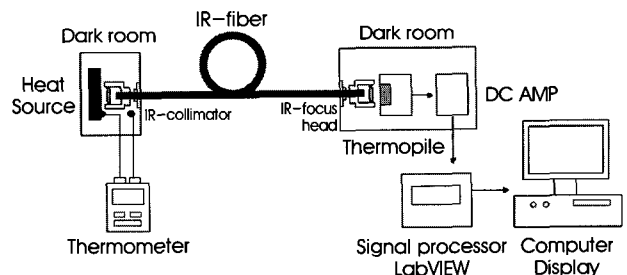


그림 10. silver halide 광섬유와 써모파일 센서를 이용한 온도 측정 실험구성

Fig. 10. Experimental setup for measuring temperature using a silver halide optical fiber and a thermopile sensor

써모파일 센서를 사용한 실험에서는 열원의 온도 변화에 따른 써모파일 센서의 출력 전압을 측정하였고 2종류의 필터에 대해서 적외선 광학 장비를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대한 열원의 온도와 써모파일 센서의 출력 전압 간의 관계를 각각 도출하였다. 그림 11은 기본 필터를 사용한 경우, 열원의 온도변화에 따른 적외선 광학 장비의 사용 유무에 의한 써모파일 센서의 출력전압의 변화를 보여준다.

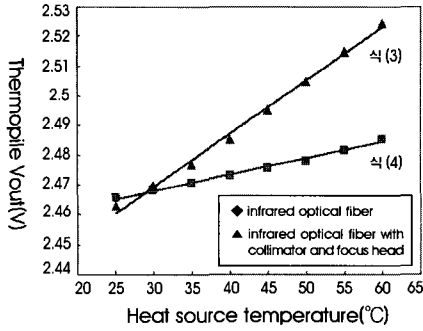


그림 11. 기본필터를 사용한 경우, 열원의 온도와 써모파일 센서 출력전압과의 관계

Fig. 11. Relationship between the temperatures of heat source and the output voltages of thermopile sensor with the standard filter

식 (3)과 (4)는 기본 필터 사용 시, 적외선 광학 장비를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 열원의 온도 (x)와 써모파일 센서 출력 전압 (y)과의 관계식을 보여주고 있으며 그 정확도는 각각 99.56 % 와 99.13 % 이다.

$$y = 0.0018x + 2.4158 \quad (3)$$

$$y = 0.0005x + 2.4517 \quad (4)$$

그림 12는 G12 필터를 사용한 경우, 열원의 온도변화에 따른 적외선 광학 장비의 사용 유무에 의한 써모파일 센서의 출력전압의 변화를 보여준다.

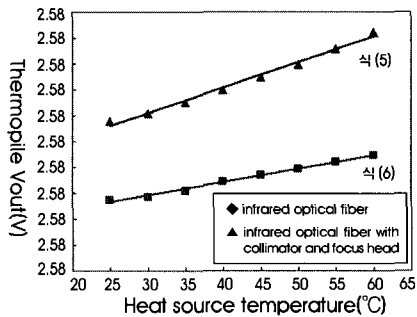


그림 12. G12 필터를 사용한 경우, 열원의 온도와 써모파일 센서 출력전압과의 관계

Fig. 12. Relationship between the temperatures of heat source and the output voltages of thermopile sensor with the G12 filter

식 (5)와 (6)은 G12 필터 사용 시, 적외선 광학 장비를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 열원의 온도 (x)와 써모파일 센서 출력 전압 (y)과의 관계식을 보여주고 있으며 그 정확도는 각각 99.22 % 와 99.41 % 이다.

$$y = 0.001x + 2.5114 \quad (5)$$

$$y = 0.0005x + 2.4938 \quad (6)$$

써모파일 센서를 사용한 실험 결과, 25~60 °C 의 좁은 온도 범위에서 적외선 광학 장비 사용의 유무에 관계없이 열원의 온도와 써모파일 센서의 출력전압이 선형적인 관계를 가졌다. 하지만 광학 장비를 사용한 경우, 열원의 온도 변화에 따른 써모파일 출력전압의 변화량이 커졌으며, G12 필터보다 기본 필터를 사용하였을 때 온도 변화에 더욱 민감하게 반응함을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 열원으로부터 방출되는 적외선을 적외선 광학 장비 및 silver halide 광섬유를 통해 전송시켜 적외선 센서로 측정 하였으며, 실험에서 측정된 열원의 온도범위는 25~60 °C 이었다. 빈의 변위법칙(Wien's displacement law)을 이용한 온도별 최대 복사 파장으로 변환하면 9.72~8.70 μm 이므로 인체에서 방출되는 적외선 최대 복사 에너지의 파장인 9.35 μm 를 포함한다. 또한 온열치료 시에 사용되는 세포 치사 온도 42.5 °C 의 적외선 복사에너지의 최대파장인 9.18 μm 역시 silver halide 광섬유를 이용하여 전송시킬 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

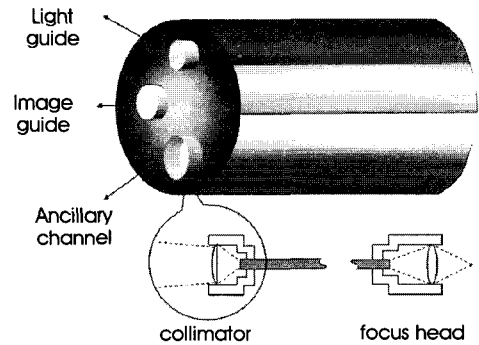


그림 13. silver halide 광섬유를 이용한 온도 측정 장치를 포함하는 내시경 시스템

Fig. 13. Schematic diagram of the proposed endoscope system including a silver halide optical fiber

그림 13과 같이 인체 내부 온도 측정에 사용할 내시경 시스템을 제안할 수 있으며, 내시경 시스템은 영상 가이드, 광 가이드 그리고 silver halide 광섬유를 이용한 온도 측정 장치를 위한 보조채널을 포함한다.

본 연구 결과를 기초로 인체 내부 온도 측정을 위한 silver halide 광섬유를 이용한 비접촉식 온도 센서의 개발이 가능할 것으로 기대되고, silver halide 광섬유를 내시경에 포함시켜 광섬유를 인체 내부에 삽입함으로써 치료 부위의 온도 분포 측정이 가능할 것으로 기대된다. 앞으로 더 수행해야 할 연구 방향은 적외선 투과 광섬유 다발을 제작하여 온도 분포를 측정하는 것이다.

### 참고문헌

- [1] M. Shimizu and S. Kachi, "Low-temperature radiometer using infrared fiber," in *Proc. 3rd Sensor Symposium*, 1983, pp. 275-276.
- [2] A. Zur and A. Katzir, "Fiber for low - temperature radiometric measurements," *J. Applied Optics*, vol. 26, no. 7, pp. 1201-1206, 1987.
- [3] J. A. Harrington, *Infrared Fibers and Their Applications*, Bellingham, USA : SPIE PRESS, 2004, pp. 1-8.
- [4] O. Eyal, A. Zur, O. Shenfeld, M. Gilo, and A. Katzir, "Silver halide fiber optic radiometer for temperature measurements of irradiated tissue," in *Proc. Fiber Optic Sensors in Medical Diagnostics*, 1993, SPIE, vol. 1886, pp. 159-171.
- [5] S. Shalem, A. German, and A. Katzir, "Optical properties of silver-halide core/clad IR Fibers," in *proc. Medical and Fiber Optic Sensors and Delivery Systems*, 1995, SPIE, vol. 2631, pp. 216-225.
- [6] T. Miyashita and T. Manabe, "Infrared optical fibers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-18, no. 10, pp. 1432-1450, 1982.
- [7] A. Katzir, H. F. Bowman, Y. Asfour, A. Zur, and C. R. Valeri, "Infrared fibers for radiometer thermometry in hypothermia and hyperthermia treatment," *IEEE T. Biomed. Eng.*, vol. 2631, pp. 216-225, 1995.
- [8] D. C. Tran, K. H. Levin, and R. Mossadegh, "IR fiber temperature sensing system," in *Proc. Infrared Optical Materials and Fibers V*, 1987, SPIE 843, pp. 148-154.