

적외선 투과 광섬유를 이용한 비접촉식 온도 센서 개발을 위한 기초 연구

유옥재 · 조동현 · 정순철 · 탁계래 · 전재훈 · 이봉수[†] · 손상희* · 조승현**

Feasibility study on the development of noncontact temperature sensor using infrared optical fiber

Wook Jae Yoo, Dong Hyun Cho, Soon-cheol Chung, Gye-Rae Tack, Jae Hoon Jun, Bongsoo Lee[†], Sang-Hee Son*, and Seunghyun Cho**

Abstract

We have developed a noncontact temperature sensor using a silver halides infrared optical fiber. An infrared radiation from a heat source is transferred by a silver halides infrared optical fiber and measured by infrared sensors such as a thermopile and a thermal optical power-meter. The relationships between the temperature of a heat source and the output voltage of the thermopile and the optical power of a thermal optical power-meter are determined. The measurable temperature range using a thermopile and a thermal optical power-meter are from 100 to 750 °C and from 30 to 70 °C respectively. It is expected that a noncontact temperature sensor using infrared optical fiber can be developed for medical and industrial usages based on the results of this study.

Key Words : infrared optical fiber, noncontact temperature sensor, infrared radiation

1. 서 론

적외선 투과 광섬유를 이용한 온도 측정 장치는 온도 측정을 하기 힘든 좁은 곳이나 움직이는 물체, 강한 전자기장에서도 온도를 측정할 수 있다는 장점을 가진다^[1]. 적외선 투과 광섬유를 이용한 온도 측정 장치는 크게 (1) 열원으로부터 입사된 적외선을 전송시켜 적외선 센서에 집광시킬 적외선 투과 광섬유(infrared optical fiber), (2) 적외선 신호를 검출하여 전기신호로 변환시킨 후 전기신호를 증폭시키는 적외선 검출 장치(infrared detector), (3) 전기신호를 처리하여 표시하는 장치(signal processor and display circuit)로 구성된다^[2].

적외선 투과 광섬유의 중요한 특성은 일반 광섬유가

전송하지 못하는 긴 파장 영역의 빛을 전송시키는 것이다. 빈의 변위법칙(Wien's displacement law)에 의하면 적외의 물체가 방출하는 복사에너지의 최대 파장은 중·원적외선 영역이므로 일반 실리카(silica) 광섬유로는 저온의 온도 측정이 불가능하다. 일반 실리카 광섬유가 0.24~2.0 μm의 전송 파장 영역을 가지는 반면, silver halides 적외선 투과 광섬유는 3~16 μm의 전송 파장 영역을 가진다. 적외선 투과 광섬유를 이용한 온도 측정에는 긴 파장을 전송시킬 수 있는 silver halides 또는 hollow waveguides 광섬유가 필요하며, 이를 이용하여 넓은 온도범위에서 온도를 측정할 수 있다^[3]. Silver halides 광섬유에서 AgCl_xBr_{1-x} 광섬유는 비교적 낮은 온도에서의 적외선 전송을 위해 사용된다. 또한 silver halides 적외선 투과 광섬유는 유연하고 불용해성이며, 무독성이다^[4]. 적외선 투과 광섬유는 산업계와 의료계에서 적외선 분광학(spectroscopy), 적외선 복사선 측정기(radiometry), 적외선 열 영상(thermal imaging) 분야에 적용 가능하다^[5,6]. 또한 인간의 체온을 약 37 °C로 볼 때, 인체에서 방출되는 적외선 복사에너지의 최대파장은 약 9.35 μm이므로 silver halides 적외선 투과 광섬유를 이용하여 전송시킬 수 있다. 그러므로

건국대학교 의료생명대학 의학공학부 (School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Konkuk University, Chungju 380-701, Korea)

*청주대학교 이공대학 전자정보공학부 (School of Electronics and Information Engineering, College of Science & Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea)

**성균관대학교 고분자기술연구소 (Polymer Technology Institute, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea)

[†]Corresponding author: bslee@kku.ac.kr

(Received : January 11, 2006, Accepted : February 27, 2006)

적외선 투과 광섬유를 내시경에 포함시켜 광섬유를 인체 내부에 삽입함으로써 장기의 온도 분포 측정이 가능하고, 온열치료를 통한 압 치료와 레이저를 이용한 최소 침습적 수술(minimal invasive surgery)에서도 온도 측정이 가능할 것으로 기대된다[7].

적외선 투과 광섬유를 이용한 온도 측정 장치가 가지는 여러 가지 장점으로 인해 적외선 투과 광섬유를 이용한 연구는 계속되어 왔으나, 종래의 연구는 고온의 물체를 열원으로 하여 물체에서 방출되는 적외선을 측정하는 비접촉식 온도 측정법과 여러 종류의 적외선 투과 광섬유의 특징 연구가 대부분이었다. 이들 장치의 구성은 주로 적외선 검출 장치 부분에 초전형 센서(pyroelectric sensor)와 초퍼(chopper) 및 lock-in amplifier를 사용하였고, 적외선 센서로 초전형 센서가 아닌 HgCdTe를 이용한 적외선 검출기를 사용한 경우에는 냉각시스템이 필요하므로 실험구성이 복잡하였다. 따라서 본 연구에서는 냉각시스템이 필요하지 않고, 실온에서 사용가능한 써모파일 센서(thermopile sensor) 및 열 센서(thermal sensor)를 이용한 열형 광 강도 검출 시스템(thermal optical power meter system)을 사용하여 실험구성을 간소화하였고, 인체 내부 온도 측정을 목적으로 하는 기초연구로서 저온의 물체를 열원으로 하여 열원에서 방출되는 적외선 검출 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 열원에서 방사되는 적외선을 적외선 투과 광섬유를 통해 전송시켜 열원의 온도 변화에 따른 써모파일 센서의 출력 전압을 측정하였고, 써모파일 센서를 사용한 실험에서 측정하지 못한 100°C 이하에서 방출되는 적외선을 측정하기 위하여 열 센서를 이용한 열형 광 강도 검출 시스템을 통해 열원의 온도와 광 강도(optical power) 간의 관계식을 도출하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 광섬유는 silver halides 적외선 투과 광섬유(MIR 860/1000 BPLC, CeramOptec Inc.)로서 자켓(jacket)을 포함한 광섬유의 외경이 1.3 mm, 코어(core)의 직경은 0.86 mm, 클래딩(cladding)의 두께는 0.07 mm이고, 코어의 굴절률은 2.1이다. 광섬유에서 코어와 클래딩은 silver halides인 AgCl:AgBr 혼합으로 구성되어 있으며 녹는점은 412°C, 동작 가능 온도범위는 -60°C~+110°C이다. 또한 적외선 전송 파장범위는 4~16 μm , 반사손실은 약 25%이고, 특히 중적외선 영역에서 광감쇄율이 낮으며 매우 유연한 기계적 성질 외에도 개구수(numerical aperture)가 크다는 장점을 갖는다.

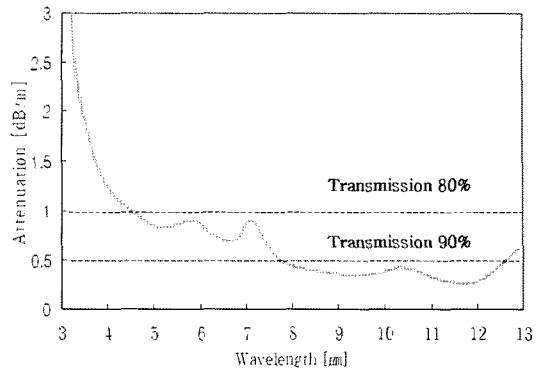


그림 1. Silver halides 적외선 투과 광섬유의 감쇄계수
Fig. 1. Attenuation coefficients of silver halides infrared optical fiber.

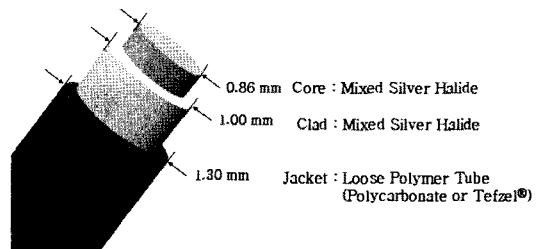


그림 2. Silver halides 적외선 투과 광섬유 구조
Fig. 2. Structure of silver halides infrared optical fiber.

그림 1은 실험에 사용된 silver halides 적외선 투과 광섬유의 파장에 따른 감쇄계수(attenuation coefficient)를 보여주고 있으며 9~13 μm 영역의 적외선 파장에서 90% 이상의 전송률을 보이고 있다.

그림 2는 silver halides 적외선 투과 광섬유의 구조를 보여주고 있다. 코어와 클래딩은 silver halides 혼합 물질이며, 자켓은 loose polymer tube로서 polycarbonate 또는 Tefzel[®]으로 구성되어 있다.

본 연구에 사용된 열원은 열 방출형 적외선 광원(IR-12K, Scitec Instruments 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 적외선 투과 광섬유를 통해서 적외선 센서인 써모파일 센서와 열 센서로 전송되고, 전송된 적외선의 특정 파장에 대해서 적외선 센서의 출력이 결정된다.

적외선 투과 광섬유를 이용한 온도측정에서는 열원과 광섬유 간의 거리를 고려해야 한다. 열원이 고온인

경우, 광섬유 내의 상태이상으로 적외선의 전송률이 떨어지거나, 광섬유의 녹는점보다 고온이 될 경우에는 광섬유가 녹게 된다. 실험에서는 적외선 투과 광섬유의 녹는점과 동작온도 범위를 고려하여 열원과 적외선 투과 광섬유 간의 거리를 1 cm로 결정하였다.

본 연구에서는 반복 실험과 무작위 실험을 통해서 열원의 온도 변화에 따른 써모파일 센서의 출력 전압과 열원의 온도 변화에 따른 광 강도를 측정하였고, 열원의 온도와 써모파일 센서 출력전압과의 관계식 및 열원의 온도와 광 강도 간의 관계식을 도출하였다.

3. 써모파일을 이용한 실험구성 및 결과

적외선 센서로는 실온에서 적외선을 감지할 수 있는 써모파일 센서(thermopile sensor module, Perkin Elmer Inc.)를 사용하였고, 센서의 감지 파장 범위 역시 적외선 투과 광섬유의 전송 범위인 4~16 μm 이다. 본 연구에서 사용한 써모파일 센서는 초전형 센서(pyroelectric sensor)와 동작원리가 같은 열형 적외선 센서(thermal detector)로서 실온에서 작동하며 파장 의존성이 적은 장점을 가진다. 또한 초전형 센서에 비해 검출능(D*)이 낮은 단점이 있지만 초퍼(chopper)를 사용할 필요가 없고, 경제적이며 간단하게 실험장치를 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림 3은 실험에 사용된 적외선 센서인 써모파일 센서 모듈을 보여주고 있다. 열원으로부터 방사된 적외선은 필터를 거쳐서 감지가 가능한 적외선 파장영역만 투과되고, 광학계를 통해서 적외선 센서에 집속된다. 실험에서 사용한 적외선 센서에는 적외선을 감지하는 써모파일과 적외선 센서의 주변온도를 감지하는 써미스터(thermistor)가 내장되어 있고, 써미스터가 센서의 온도를 측정하므로 센서 주변온도에 따른 보정이 가능하다. 써모파일에서 적외선 신호를 전기신호로 변환하면, 증폭회로는 미세한 센서의 출력전압을 증폭시키게 된다.

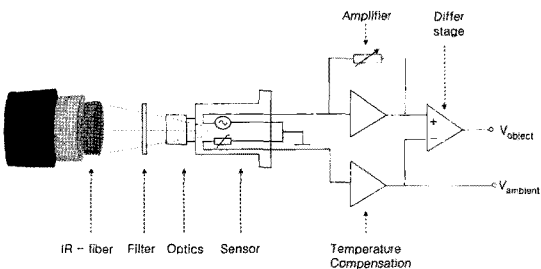


그림 3. 써모파일 센서 모듈 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of the thermopile sensor module.

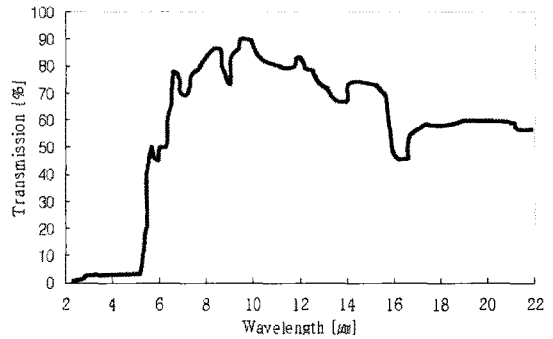


그림 4. 써모파일 센서 모듈에 사용된 적외선 필터의 투과율
Fig. 4. Transmission rate of the infrared optical filter in the thermopile sensor module.

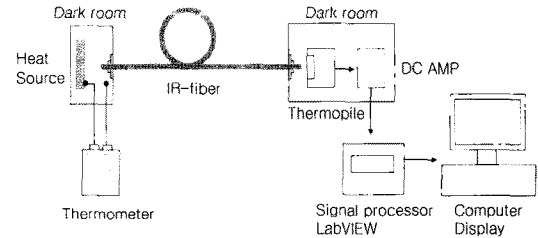


그림 5. 적외선 투과 광섬유와 써모파일 센서를 이용한 온도 측정 실험구성
Fig. 5. Experimental setup for measuring temperature using an infrared optical fiber and a thermopile sensor.

그림 4는 써모파일 센서 모듈에 사용된 필터의 파장에 따른 투과율을 보여주고 있다.

그림 5는 적외선 광섬유와 써모파일 센서를 이용한 실험구성을 보여주고 있다. 열원, 적외선 광섬유 그리고 써모파일 센서를 일직선상에 위치시키고 열원 및 적외선 광섬유 끝단은 주위 광원의 영향을 최소화하기 위해서 암실처리를 하였다.

써모파일 센서를 사용한 실험에서는 열원의 온도 변화에 따른 써모파일 센서의 출력 전압을 측정하였다. 실험은 실온 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서 수행하였고 적외선 투과 광섬유를 사용하기 전에 써모파일 센서만을 사용하여 열원의 온도변화에 따른 써모파일 센서의 출력전압을 측정하였다. 써모파일 센서 주변 온도가 25 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 출력전압은 1.5880 V로 측정되었고, 실험에서 써모파일 센서만을 이용한 온도측정 범위는 25~80 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

그림 6은 적외선 투과 광섬유를 사용하지 않은 경우, 열원의 온도변화에 따른 써모파일 센서의 출력전압의 변화를 보여준다.

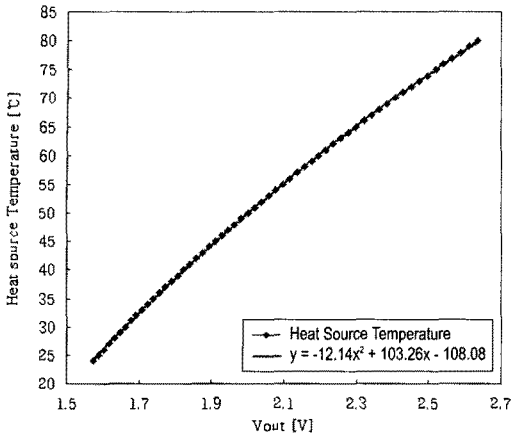


그림 6. 적외선 투과 광섬유를 사용하지 않은 경우, 열원의 온도와 써모파일 센서 출력전압과의 관계
 Fig. 6. Relationship between a heat source temperature and an output voltage of thermopile sensor without an infrared optical fiber.

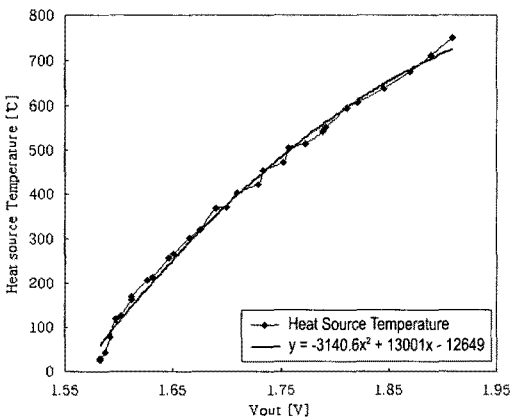


그림 7. 적외선 투과 광섬유를 사용한 경우, 열원의 온도와 써모파일 센서 출력전압과의 관계
 Fig. 7. Relationship between a heat source temperature and an output voltage of thermopile sensor with an infrared optical fiber.

식 (1)은 적외선 투과 광섬유를 사용하지 않은 상태에서 열원의 온도와 써모파일 센서 출력전압과의 관계식을 보여주고 있으며, 그 정확도는 99.99%이다.

$$y = -12.14x^2 + 103.26x - 108.08 \quad (1)$$

그림 7은 그림 5의 실험구성과 같이 적외선 투과 광섬유를 사용한 상태에서 열원의 온도변화에 따른 써모파일 센서의 출력 전압을 보여주고 있다. 열원이 60°C

가 될 때까지 써모파일 센서의 출력 전압은 거의 변화가 없었고, 그 이상에서 출력 전압은 증가하기 시작하였다. 그러나 무작위 실험과 반복실험을 한 결과, 열원의 온도가 100°C 이상일 때, 주변 온도에 관계없이 열원의 온도와 써모파일 센서 출력전압 간에 재현성을 보였다. 실험에서의 적외선 투과 광섬유를 이용한 온도 측정의 범위는 100~750°C이다.

식 (2)는 적외선 투과 광섬유를 사용한 경우, 열원의 온도와 써모파일 센서 출력 전압과의 관계식을 보여주고 있고, 이 경우 관계식과 실험값과의 정확도는 99.45%이다.

$$y = -3140.6x^2 + 13001x - 12649 \quad (2)$$

실험 결과, 써모파일 센서를 사용한 실험에서의 측정 가능한 열원의 온도 범위는 100~750°C로 100°C 이하의 열원에서 방출되는 적외선을 측정하지 못하였다. 써모파일 센서가 60°C 이상에서부터 반응을 보였지만, 반복성과 정확성이 떨어졌기 때문에 열 센서를 이용한 열형 광 강도 검출 시스템을 통해 동일한 조건에서 실험을 수행하였다.

4. 열형 광 강도 검출 시스템을 이용한 실험구성 및 결과

열형 광 강도 검출 시스템은 적외선 센서와 검출기로 구성되며, 적외선 센서로는 실온에서 적외선을 감지할 수 있는 열 센서(S212A 10W thermal sensor, THORLABS Inc.)를 사용하였고, 이 센서의 감지 파장 범위는 적외선 투과 광섬유의 전송 범위를 포함하는 0.25~10.6 μm이다. 열 센서는 광 강도 검출기(PM 100 optical power-meter, THORLABS Inc.)와 연결된다. 검출기는 광 강도를 측정하고 최근값, 최대값, 최소값, 평균값을 보여준다.

그림 8은 적외선 투과 광섬유와 열형 광 강도 검출 시스템을 이용한 실험구성을 보여주고 있다. 써모파일 센서를 사용한 실험과 동일한 방법으로 열원, 적외선 투과 광섬유 그리고 열 센서를 일직선상에 위치시키고 암실처리를 하였다.

열 센서를 이용한 열형 광 강도 검출 시스템을 사용한 실험에서 적외선 투과 광섬유를 사용하기 전에 열 센서만을 사용하여 열원의 온도변화에 따른 광 강도를 측정하였다. 열 센서만을 이용한 실험에서 광 강도 측정을 위한 열원의 온도 범위는 30~70°C이다.

그림 9는 적외선 투과 광섬유를 사용하지 않은 경우,

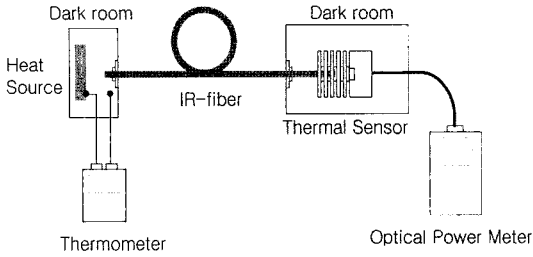


그림 8. 적외선 투과 광섬유와 열형 광 강도 검출기를 이용한 온도측정 실험 구성
 Fig. 8. Experimental setup for measuring temperature using an infrared optical fiber and a thermal optical power-meter.

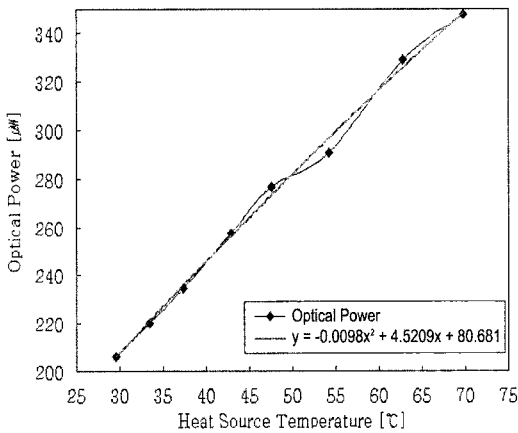


그림 9. 적외선 투과 광섬유를 사용하지 않은 경우, 열원의 온도와 광 강도 간의 관계
 Fig. 9. Relationship between a heat source temperature and an optical power without an infrared optical fiber.

열원의 온도변화에 따른 열형 광 강도 검출 시스템으로 측정된 광 강도의 변화를 보여준다.

식 (3)은 적외선 투과 광섬유를 사용하지 않은 경우, 열원의 온도와 광 강도 간의 관계식을 보여주고 있으며, 그 정확도는 99.65%이다.

$$y = -0.0098x^2 + 4.5209x + 80.681 \quad (3)$$

그림 10은 그림 8의 실험구성과 같이 적외선 투과 광섬유를 사용한 상태에서 열원의 온도변화에 따른 광 강도의 변화를 보여주고 있다. 실험에서 광 강도 측정을 위한 열원의 온도 범위는 30~70°C이다.

식 (4)는 적외선 투과 광섬유를 사용한 경우, 열원의 온도와 광 강도의 관계식을 보여주고 있고, 이 경우 관

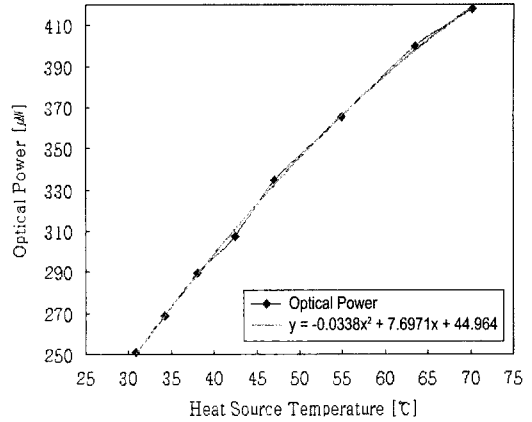


그림 10. 적외선 투과 광섬유를 사용한 경우, 열원의 온도와 광 강도 간의 관계
 Fig. 10. Relationship between a heat source temperature and an optical power with an infrared optical fiber.

계식과 실험값과의 정확도는 99.92%이다.

$$y = -0.0338x^2 + 7.6971x + 44.964 \quad (4)$$

5. 결 론

본 연구에서는 적외선 투과 광섬유를 이용하여 열원으로부터 방출되는 적외선을 적외선 센서로 측정하였다. 써모파일 센서를 이용하여 열원의 온도와 써모파일 센서 출력 전압과의 관계식을 도출한 실험에서 측정 가능한 온도범위는 100~750°C이었다. 60~100°C의 온도범위에서도 써모파일의 출력 전압의 변화가 관찰되었지만 반복성과 정확성이 떨어졌다. 100°C 이하의 열원에서 방출되는 적외선을 측정하기 위한 적외선 센서의 대안으로 열 센서를 이용한 열형 광 강도 검출 시스템을 통해 열원의 온도와 광 강도 간의 관계식을 도출하였다. 열 센서를 사용한 광 강도 측정 실험에서 측정된 온도범위는 30~70°C이었다. 빈의 변위법칙을 이용한 온도별 최대 복사 파장으로 변환하면 9.56~8.45 μm이므로 인체에서 방출되는 적외선 최대 복사 에너지의 파장인 9.35 μm를 포함한다. 열원에서 방출된 9.56~8.45 μm의 적외선이 적외선 광섬유를 통해 센서까지 전송됨을 열형 광 강도 검출 시스템을 통하여 확인하였다. 그러므로 인체 내부 온도 측정을 위한 적외선 투과 광섬유를 이용한 비접촉식 온도측정 실험에서 100°C 이하의 온도를 측정하기 위해서는 열원과 근접하고 있는 적외선 광섬유 끝단에 열원으로부터 방출되

는 적외선을 집광할 수 있는 광학계를 사용함으로써 해결 가능할 것으로 보이며, 본 연구 결과를 기초로 인체 내부 온도 측정을 위한 적외선 투과 광섬유를 이용한 비접촉식 온도 센서의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 교육인적자원부 지방연구중심 대학 육성사업의 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] M. Shimizu and S. Kachi, "Low-temperature radiation using infrared fiber", *Japanese Journal of Applied Physics*, Reprinted by Permission of the Publisher from *Proceedings of the 3rd Sensor Symposium*, pp. 275-276, 1983.
- [2] A. Zur and A. Katzir, "Fiber for low - temperature radiometric measurements", *Optical Society of America, Reprinted by Permission of the Publisher from Applied Optics*, vol. 26, no. 7, pp. 1201-1206, 1987.
- [3] J. A. Harrington, "Infrared fibers and their applications", *SPIE PRESS*, Bellingham, pp. 1-8, 2004.
- [4] O. Eyal, A. Zur, O. Shenfeld, M. Gilo, and A. Katzir, "Silver halide fiber optic radiometer for temperature measurements of irradiated tissue", *Fiber Optic Sensors in Medical Diagnostics, SPIE*, vol. 1886, pp. 159-171, 1993.
- [5] S. Shalem, A. German, and A. Katzir, "Optical properties of silver-halide core/clad IR fibers", *SPIE*, vol. 2631, pp. 216-225, 1995.
- [6] T. Miyashita and T. Manabe, "Infrared optical fibers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-18, no. 10, pp. 1432-1450, 1982.
- [7] D. C. Tran, K. H. Levin, and R. Mossadegh, "IR fiber temperature sensing system", *Infrared Optical Materials and Fibers V, Proc. SPIE*, vol. 843, pp. 148-154, 1987.



유욱재

- 2006년 건국대학교 의학공학부 의용전자 전공 졸업(공학사)
- 2006년~현재 건국대학교 의학공학부 석사과정(공학석사)
- 주관심분야 : 의광학, 의료영상, 의료방사선공학

조동현

- 『센서학회지 제14권 제4호』 pp. 248 참조

정순철

- 『센서학회지 제12권 제5호』 pp. 225 참조

탁계래

- 1985년 2월 한양대학교 기계설계학과 학사(공학사)
- 1987년 2월 동대학 석사(공학석사)
- 1991년 12월 U. of Iowa 박사(공학박사)
- 1992년 1월~1992년 8월 동대학 Post-doc
- 1992년 9월~1995년 3월 Vanderbilt U. Research Associate
- 1995년 7월~1997년 2월 삼성SDS 정보기술연구소 PACS Lab Director
- 1997년 3월~현재 건국대학교 의학공학부 부교수
- 2003년 8월~2004년 8월 캐나다 U. of Calgary 방문교수

전재훈

- 1986년 고려대학교 화학공학과 졸업(공학사)
- 1993년 Texas A. M. 화학공학과 졸업(공학석사)
- 2001년 Texas A. M. 의공학과 졸업(공학박사)
- 2004년~현재 건국대학교 의학공학부 조교수

이봉수

- 『센서학회지 제13권 제3호』 pp. 213 참조

손 상 희

- 1960년 3월 25일생
- 1983년 한양대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1988년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1988년~1990년 순천향대학교 전산학과 전임강사
- 1991년~2006년 현재 청주대학교 이공대학 전자정보공학부 교수

조 승 현

- 『센서학회지 제13권 제3호』 pp. 213 참조