

원전 냉각계통에서의 온도측정을 위한 적외선 광섬유 기반의 접촉식 온도 감지 프로브

유욱재¹ · 장경원¹ · 문진수¹ · 한기택¹ · 전다영¹ · 박병기² · 이봉수^{1*}

¹건국대학교 의료생명대학 의공학부,
의공학실용기술연구소

²순천향대학교 공과대학 에너지환경공학과

Infrared Optical Fiber-based Contact Temperature Sensing Probe for Thermometry in Coolant System of Nuclear Power Plants

Wook Jae Yoo¹, Kyoung Won Jang¹, Jinsoo Moon¹, Ki-Tek Han¹, Dayeong Jeon¹, Byung Gi Park², Bongsoo Lee^{1*}

¹School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University

²Department of Energy & Environment Engineering, College of Engineering, Soonchunhyang University

Abstract

In this study, we developed an infrared fiber-optic temperature sensor using a silver halide optical fiber for thermometry in the coolant system of a nuclear power plant. The performance of contact temperature sensing probe was assessed in an autoclave that was filled with an aqueous coolant solution containing

boric acid and lithium hydroxide. We carried out real-time monitoring of the infrared radiation emitted from the temperature sensing probe according to temperature variation over a temperature range from 60 to 250°C. It is expected that the proposed temperature sensing probe and the infrared fiber-optic temperature sensor can be developed to accurately monitor temperature in harsh environments.

Keywords : fiber-optic sensor, thermometry, infrared optical fiber, coolant system, harsh environment

서 론

원자력발전소 가압경수로(pressurized water reactor, PWR)의 냉각계통(coolant system)에는 RTD(resistance temperature detector)와 열전대(thermocouple)가 접촉식 온도센서로 사용되고 있다. 그리고 원전을 비롯한 산업계에서는 고온 측정용으로 적외선 온도계(radiometer)가 널리 사용되고 있다.

첫 번째로 RTD는 온도-저항의 선형특성이 우수하고 정확도가 높지만, 프로브(probe)의 직경이 크고 설치위치에 따라 1.0~8.0초의 느린 응답시간을 가진다. 두 번째 열전대의 경우, RTD보다 정확도가 낮지만 프로브의 직경이 작고, 응답시간이 빠르다는 장점을 가진다. 공업용으로 널리 사용되는 RTD와 열전대는 고온 측정 시 정확도가 떨어지고, 상시 온도교정이 필요하다. 또한 부식을 비롯한 외부오염에 취약하고 전자기파, 고주파 및 유도기전력이 발생하는 장치에서는 사용하기 힘든 단점이 있다[1]. 세 번째로 적외선 온도계는 RTD와 열전대가 측정하지 못하는 고온 상태의 열원을 비접촉식(noncontact)으로 표면온도를 측정할 수 있다. 하지만 이러한 비접촉식 온도센서를 냉각계통의 온도측정에 사용할 경우, 배관 내부의 온도를 직접적으로 측정할 수 없다는 단점을 가진다.

본 연구에서는 기존의 전자식 및 비접촉식 온도센서가 가지는 단점들을 보완하고, 냉각계통의 배관 내부와 같은 고온/고압 환경에서 온도를 측정할 수 있는 적외선

* 380-701 충북 충주시 단월동 건국대학교 의료생명대학 의공학부
전화 : 043-856-0976, Fax : 043-851-0620, E-mail : bslee@kku.ac.kr

투과 광섬유(infrared optical fiber) 기반의 접촉식 온도 감지 프로브(contact temperature sensing probe)를 개발하였다.

적외선 투과 광섬유를 이용한 온도센서의 기본원리는 열원에서 방출되는 적외선을 적외선 투과 광섬유를 통해 적외선 검출기로 전송시키고, 열원의 표면온도와 전송된 적외선 신호 사이의 관계를 통해 온도를 측정하는 것이다[2,3]. 흑체방출이론(blackbody radiation theory)에서 스테판-볼츠만의 법칙(Stefan-Boltzmann's law)에 따르면 열원에서 방출되는 적외선의 강도(intensity, I)는 열원의 절대온도(absolute temperature, T)에 비례하고, 그 관계는 식 (1)과 같다[4-6].

$$I = \epsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 상수로서 $\sigma = 5.67 \times 10^{-12}$ [$W/(cm^2 \cdot K^4)$]이고, ϵ 는 방사율(emissivity)을 나타내며 흑체의 방사율은 $\epsilon = 1.00$ 이다. 이 식에 따르면 열원에서 방출되는 적외선의 강도는 열원의 온도와 방사율에 비례하며 열원의 온도가 동일할 경우, 열원이 가지는 방사율에 따라 강도가 변하게 된다. 일반적인 비접촉식 온도센서의 경우, 측정하고자 하는 열원의 종류에 따라 서로 다른 방사율을 적용시켜야 한다. 그러므로 열원의 표면 상태에 따른 방사율 변화에 영향을 받지 않고, 고온/고압의 수화학 환경(water-chemistry environment)에서 사용 가능한 새로운 형태의 적외선 온도센서의 개발이 필요하다[7].

본 연구에서 개발한 적외선 광섬유를 이용한 접촉식 온도센서의 온도 감지 프로브는 고온/고압환경에 견딜 수 있게 설계하였고, 고온의 상태에 있는 열원의 내부에 삽입하여 내부의 온도를 직접적으로 실시간 모니터링할 수 있도록 제작하였다.

실험재료 및 방법

본 연구에서 개발한 적외선 광섬유 온도센서(infrared fiber-optic temperature sensor)는 온도 감지 프로브와 적외선 검출기-증폭시스템으로 구성된다. 그림 1은 온도 감지 프로브의 구조를 보여주며, 프로브는 크게 캡(cap), 튜브(tube) 그리고 적외선 투과 광섬유로 구성된다.

감지 물질 및 적외선 전송경로로서의 역할을 동시에

수행하는 적외선 투과 광섬유로는 실버 할라이드 광섬유(silver halide optical fiber: PIR 900/1000, JT Ingram)를 선택하였다. 실버 할라이드 광섬유의 코어(core)와 클래딩(cladding)은 AgClBr(silver bromide chloride) 다결정(polycrystalline)으로 불용해성(water-insoluble), 무독성(non-toxic)이며 유연한 성질을 갖는다[8]. 실험에 사용한 실버 할라이드 광섬유의 코어 직경은 0.9 mm이고, 클래딩의 두께는 0.05 mm이다. 또한 코어의 굴절률(refractive index)은 2.15이고, 개구수(numerical aperture, NA)는 0.25이다. 광섬유의 녹는점은 415℃이고, 적외선 전송 파장범위는 중적외선 영역인 4~18 μm 이다.

고온/고압의 수화학 환경으로부터 광섬유를 보호하기 위하여 프로브의 캡(316-WBK-VJD-400-C, Swagelok)과 튜브(1/4 inch)는 스테인리스 강(stainless-steel)으로 제작하였다. 캡은 외부의 온도변화에 반응하여 스테판-볼츠만의 법칙에 따른 특정 강도를 가진 적외선을 방출하며, 실버 할라이드 광섬유는 적외선 전송경로로서의 역할을 수행한다. 녹는점이 343℃인 PEEK(polyetheretherketone) 재질의 광섬유 자켓(jacket) 외부에는 녹는점이 327℃이고, 화학제에 강한 테플론(polytetrafluoroethylene, PTFE) 테이프를 코팅함으로써 실버 할라이드 광섬유를 외부환경으로부터 이중으로 보호하였다.

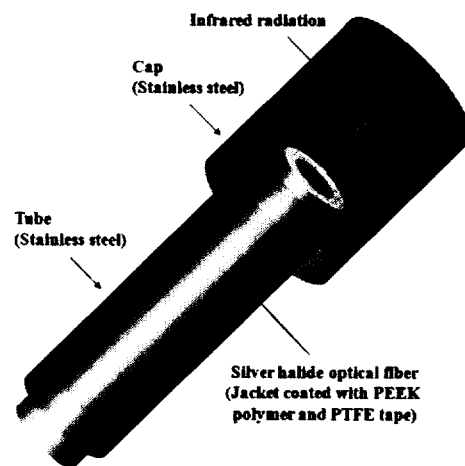


Fig. 1. Structure of a temperature sensing probe

온도 감지 프로브로부터 전송된 적외선 신호를 측정하기 위한 적외선 검출기로는 실온에서 적외선을 감지할 수 있는 열전쌍열(thermopile: A2TPMI3340AA060, Perkin Elmer Inc.)을 사용하였다. 열전쌍열은 주위온도 $25 \pm 1^\circ C$, 측정물체의 방사율 및 온도가 각각 99% 이

상, $60 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 일 때의 교정점 (calibration point)에서 $\pm 1.5\text{ K}$ 의 정확도를 가진다. 열전쌍열은 실온에서 작동하고 파장 의존성이 적은 장점을 가지며, 측정 가능한 적외선 파장범위는 $2\sim 22\ \mu\text{m}$ 이다.

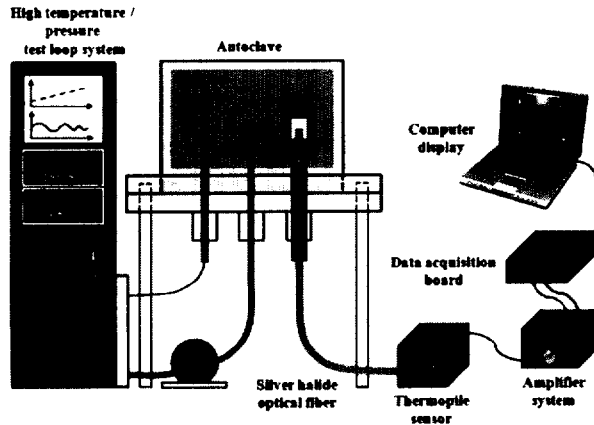


Fig. 2. Experimental setup for thermometry using the infrared fiber-optic temperature sensor and the high temperature/pressure test loop system

그림 2는 적외선 광섬유 온도센서 시스템의 전체 실험 구성을 보여준다. 원전 냉각계통의 모사장치인 고온/고압 시험장치(HT/HP Loop System, UTO Engineering)의 고압 용기(autoclave) 내부에 삽입한 온도 감지 프로브의 성능평가를 위하여 붕산(boric acid, H_3BO_3)과 수산화리튬(lithium hydroxide, LiOH)을 증류수(distilled water)에 용해시킨 냉각제(coolant solution)를 사용하였다.

고압용기 내부 냉각제의 온도변화에 반응한 온도 감지 프로브의 캡 내부에서 특정 강도를 가지는 적외선이 방출되고, 실버 할라이드 광섬유를 통해 열전쌍열-증폭 시스템으로 전송된다. 열전쌍열은 적외선 신호를 전기신호로 변환시키고, 증폭시스템은 미세한 전기신호를 증폭시킨다. 증폭된 출력전압은 신호수집장치를 거쳐 최종적으로 컴퓨터 디스플레이하게 된다.

실험 결과

고압용기 내부의 온도를 측정하는 기준 온도센서로는 열전대를 사용하였고, 열전대로 측정한 냉각제의 온도와 적외선 광섬유 온도센서의 출력신호를 비교하여 관계식을 도출하였다.

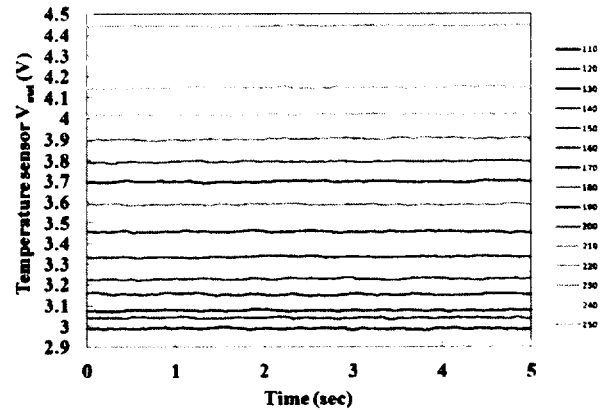


Fig. 3. Real-time temperature monitoring of the infrared fiber-optic temperature sensor

그림 3은 냉각제의 온도변화에 반응한 온도 감지 프로브의 캡에서 온도에 따라 각기 다른 최대방출파장 (peak exitance wavelength)을 가지는 적외선들이 방출되고, 이에 따라 측정된 적외선 광섬유 온도센서의 출력신호를 보여준다. 냉각제의 온도가 상승함에 따라 온도센서의 출력신호가 커지는 것을 볼 수 있고, 실시간 모니터링이 가능함을 확인할 수 있다.

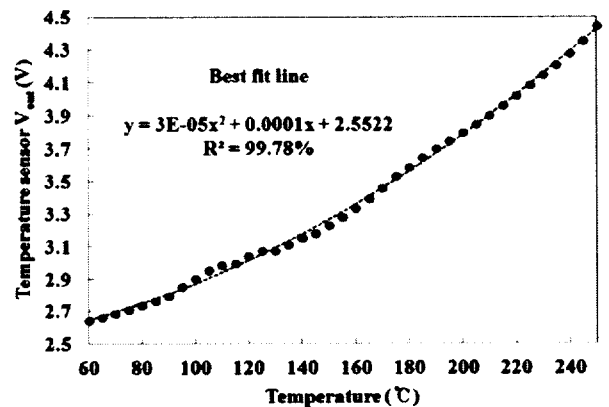


Fig. 4. Relationship between the temperature of the coolant solution and the response of the infrared fiber-optic temperature sensor

그림 4는 냉각제의 온도와 적외선 광섬유 온도센서의 출력신호 사이의 관계를 보여준다. 그림에서 보듯이 $60\sim 250^\circ\text{C}$ 범위에서 냉각제의 온도가 상승함에 따라 온도센서의 출력신호가 커지는 것을 확인할 수 있다. 냉각제의 온도(x)와 적외선 광섬유 온도센서(y)의 관계식은 $y = (3 \times 10^{-5})x^2 + 0.0001x + 2.5522$ 이며, 이때의 정확도는 99.78%이다.

결 론

본 연구는 원전 냉각계를 비롯한 고온/고압의 수화학 환경에서 사용 가능한 광섬유 온도센서를 개발하기 위한 연구로서 스테인리스 강 재질의 캡과 튜브 그리고 실버 할라이드 광섬유로 구성된 온도 감지 프로브를 기반으로 한다는 것이 특징이다.

고온을 측정하기 위한 현 시스템에서는 RTD와 열전대를 사용하고 있지만 오염 및 부식에 취약하고, 전자기파 또는 고주파의 영향으로 온도측정이 불안정한 단점을 가진다. 이에 반해 현재까지 개발 및 연구 보고된 적외선 광섬유 기반의 온도센서들은 강한 전자기장 및 고주파 환경에서 사용가능하고, 장거리 전송이 가능하다는 장점을 가진다[8-10].

본 연구에서 제안하는 접촉식 온도 감지 프로브 및 적외선 광섬유 온도센서는 비정상 상태의 조기 탐지가 가능하고, 고온/고압 상태인 각종 배관에서의 온도분포 및 변화를 측정할 수 있다. 또한 열원의 방사율에 의한 영향을 받지 않는다는 장점을 가진다. 실시간 측정 및 신호의 장거리 전송이 가능한 광섬유 기반의 온도 센서는 원전과 같은 특별한 환경에서 뿐만 아니라 유사한 환경을 가지며, 인간의 직접적인 접근이 어렵고 전자기파의 간섭이 심한 산업 분야에서 활용도가 높을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(20110006337).

참 고 문 헌

- [1] H. M. Hashemian and Jin Jiang: Nuclear plant temperature instrumentation, Nucl. Eng. Des. 239: 3132-3141 (2009).
- [2] A. Katzir, H. F. Bowman, Y. Asfour, A. Zur and C. R. Valeri: Infrared fibers for radiometer thermometry in hypothermia and hyperthermia treatment, IEEE Trans. Biomed. Eng. 36: 634-637 (1989).
- [3] T. Miyashita and T. Manabe: Infrared optical fibers, IEEE J. Quant. Electron. QE-18: 1432-1450 (1982).
- [4] S. Sade and A. Katzir: Fiberoptic infrared radiometer for real time in situ thermometry inside an MRI system, Magn. Reson. Imag. 19: 287-290 (2001).
- [5] M. Saito and K. Kikuchi: Infrared optical fiber sensors, Opt. Rev. 4: 527-538 (1997).
- [6] E. L. Dereniak and G. D. Boreman: Infrared Detectors and Systems, Wiley-Interscience, New York, NY, USA (1996) 55-79
- [7] T. Ueda, M. Sato, A. Hosokawa and M. Ozawa: Development of infrared radiation pyrometer with optical fibers - two-color pyrometer with non-contact fiber coupler, CIRP Ann-Manuf. Technol. 57: 69-72 (2008).
- [8] W. J. Yoo, D. H. Cho, K. W. Jang, S. H. Shin, J. K. Seo, S. -C. Chung, B. Lee, B. G. Park, J. H. Moon, Y. -H. Cho and S. Kim: Infrared radiation thermometer using a silver halide optical fiber for thermal ablation, Opt. Rev. 16: 386-390 (2009).
- [9] S. Sade and A. Katzir: Spectral emissivity and temperature measurements of selective bodies using multiband fiber-optic radiometry, J. Appl. Phys. 96: 3507-3513 (2004).
- [10] O. Eyal, V. Scharf and A. Katzir: Temperature measurements using pulsed photothermal radiometry and silver halide infrared optical fibers, Appl. Phys. Lett. 70: 1509-1511 (1997).