

중공 광섬유를 이용한 광섬유 간섭계형 온도센서

박재희[†] · 김광택*

Fiber-optic interferometric temperature sensor using a hollow fiber

Jaehee Park[†] and Kwang-Taek Kim*

Abstract

A fiber-optic interferometric temperature sensor is fabricated using a hollow optical fiber with 8 μm air hole. This interferometric sensor for measuring temperature consists of 13 mm long hollow optical fiber whose one end is attached to the single mode fiber and the other end is cleaved. After the sensor is put in a furnace, the phase change of the sensor output signal is measured as the temperature of the furnace increases from 28 $^{\circ}\text{C}$ to 100 $^{\circ}\text{C}$. The phase change of the fiber sensor is proportional to the change of temperature and the relationship between the change of phase and temperature is approximately linear. The sensitivity of this sensor is 2.7 radians/ $^{\circ}\text{C}$.

Key Words : fiber-optic sensor, temperature, hollow optical fiber

1. 서 론

최근 개발되는 광센서들은 산업용, 의료용, 군사용 등 사회 전반에 걸쳐서 광범위하게 사용되어지고 있다. 그 중에서 광섬유를 이용한 센서는 광섬유 자체가 센서로서의 역할과 신호의 전송 역할을 동시에 수행할 뿐만 아니라 기존의 전자센서(물리적, 전기적, 화학적)에 비해 감지속도가 빠르고, 전자파에 영향을 받지 않고, 넓은 범위를 감지할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[1]. 특히 전자센서를 사용하기 어려운 환경에서도 비교적 정확한 측정을 할 수 있기 때문에 광섬유 온도센서를 포함한 다양한 광섬유 센서들이 개발 되어졌다. 개발된 광섬유 센서들은 크게 강도형 센서와 간섭계형 센서로 나누어지며, 높은 센싱 감도가 요구되어 지는 곳에서는 간섭계형 센서가 많이 사용되어진다.

광섬유 간섭계형 센서는 마이켈슨(Michelson), 마하젠더(Mach-Zehnder), 사냐크(Sagnac), 페브리-페로(Fabry-Perot)간섭계등을 사용하여 개발되어졌다^[2]. 그 중에서

좁은 지역의 온도, 압력 등과 같은 물리적인 양을 측정하기 위해서는 페브리-페로 간섭계의 사용이 적합하다. 광섬유 페브리-페로 간섭계는 크게 intrinsic 페브리-페로 간섭계와 extrinsic 페브리-페로 간섭계로 나누어진다. Intrinsic 페브리 페로 간섭계는 일반 단일모드 광섬유의 끝 단면이 코팅된 두 개의 광섬유 거울로 제작되어졌으며 이를 이용하여 온도센서^[3], 압력센서^[4], 초음파^[5]센서등이 연구되어졌다. 이 페브리-페로 센서는 높은 감도를 가지나 제작공정이 복잡하여 간섭계의 제작이 매우 어렵다. Extrinsic 페브리-페로 간섭계^[6-7]는 단일모드 광섬유, 멀티모드 광섬유, 및 hollow-core tube를 사용하여 개발되어졌으며 자장 센서, 압력 센서, 온도센서등의 개발에 사용되어졌다. 이 간섭계 센서들은 제작공정은 단순하나 공진기가 공기로 구성되어 있기 때문에 공진기의 길이를 길게 할 수 없어 높은 감도를 가질 수 없다. 그리고 Silica capillary tube^[8]와 코어 사이즈가 다른 두 개의 단일모드 광섬유^[9]를 사용한 페브리-페로 간섭계 센서의 개발이 보고된 적이 있다. 본 연구에서는 좁은 지역의 온도, 압력 등과 같은 물리적인 양의 측정에 용이하며, intrinsic 페브리-페로 간섭계와 유사한 센싱 감도를 가지고 있으면서 extrinsic 페브리-페로 간섭계 보다 제작공정이 단순한 중공 광섬유를 이용한 간섭계^[10]를 제작하고 이를 온도 측정에 적용해 보았다.

계명대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Keimyung University)

*호남대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Honam University)

[†]Corresponding author: jpark@kmu.ac.kr

(Received : October 19, 2006, Accepted : April 2, 2007)

2. 중공 광섬유 간섭계의 동작원리

중공 광섬유는 특수 광섬유로서 코어와 코어를 둘러싸고 있는 클래딩으로 구성된 일반 광섬유와 같이 코어와 클래딩으로 구성되어 있거나 코어의 중앙에 클래딩 역할을 하는 공기구멍을 가지고 있다. 중공 광섬유에서 빛은 코어와 클래딩 영역과 코어와 공기영역에서 전반사 하면서 계속 진행한다^[11]. 중공 광섬유를 사용하여 간섭계형 센서를 개발할 경우 일반 광섬유 보다 부피가 작기 때문에 더 좋은 감도의 센서를 개발 할 수 있다.

중공 광섬유를 이용한 광섬유 간섭계(Hollow Optical Fiber Interferometer, HOFI)의 개략도는 그림 1과 같다. 광섬유 간섭계는 일반 통신용 단일모드광섬유(single Mode Fiber, SMF)에 붙어있고, 다른 끝 단면이 수직으로 절단된 중앙에 공기구멍을 가진 중공광섬유로 구성되어 있다. 광섬유 간섭계의 첫 번째 거울은 SMF와 중공광섬유가 붙어있는 중앙의 광섬유-공기 경계면에 발생되며, 두 번째 거울은 중공광섬유의 끝 단면의 광섬유-공기 경계면에서 만들어진다. SMF에서 진행되던 빛(E_i)은 중공광섬유와 접속지점에서 광섬유-공기 경계면으로 진행하던 빛은 일부 반사하고(E_{r1}) 다른 면으로 진행하던 빛은 모두 투과한다. 투과된 빛은 중공 광섬유 끝 단면에서 일부는 반사하여 접속지점으로 되돌아온다(E_{r2}). 접속지점에서 접속 면에서 반사된 빛과 끝 단면에서 반사된 빛이 만나서 서로 간섭을 일으킨다. 접속지점에서의 간섭신호^[12]와 위상변화는

$$I_r = I_i(R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi) \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{4\pi n L}{\lambda} \quad (2)$$

이다. I_i 는 입사광, I_r 은 반사광, R_1 은 접속 면에서의 반

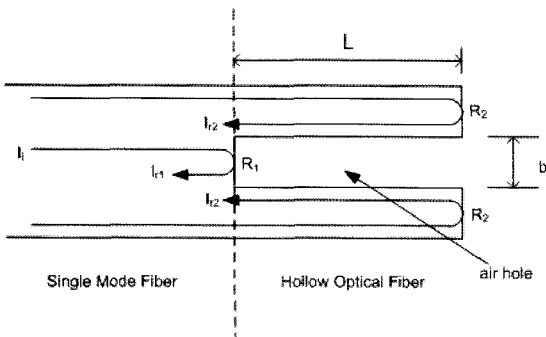


그림 1. Hollow optical fiber interferometer 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of a hollow optical fiber interferometer.

사율, R_2 는 중공 광섬유 끝 단면에서의 반사율, n 은 광섬유 굴절률, L 은 간섭계의 길이, λ 는 빛의 파장이다. 수식 (1)과 수식(2)에서 반사광은 광섬유 간섭계의 굴절률과 길이의 코사인 함수임을 보여주고 있다. 주변 온도가 변하면 광섬유의 굴절률과 길이가 변하며 이로 인하여 반사광의 크기가 변하게 된다. 그래서 반사광의 변화로부터 주변 온도변화를 읽어낼 수 있다. 광섬유로 진행하는 빛이 근사적으로 가우시안 모양을 가진다는 가정 하에^[13], 접속 면에서의 반사율(R_1)과 끝 단면에서의 반사율(R_2)는 수식(3)과 수식(4)와 같이 표현되어 질수 있다.

$$R_1 = 3.5 \frac{\int_0^{0.5b} e^{-\left(\frac{r}{\omega}\right)^2} r dr}{\int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{r}{\omega}\right)^2} r dr} \quad (3)$$

$$R_2 = 3.5 - R_1 \quad (4)$$

여기서 ω 는 mode field 반지름, b 는 중공 광섬유의 공기구멍의 지름이다. 그림 2는 가 9.2 μm 인 SMF를 사용했을 경우 중공광섬유의 공기구멍의 지름에 따른 반사율을 계산한 결과 그래프이다. 공기구멍의 크기가 커지면 R_1 은 증가하고 R_2 는 감소하였으며 공기구멍이 약 5.42 μm 일 때 R_1 과 R_2 가 같은 값을 가졌다.

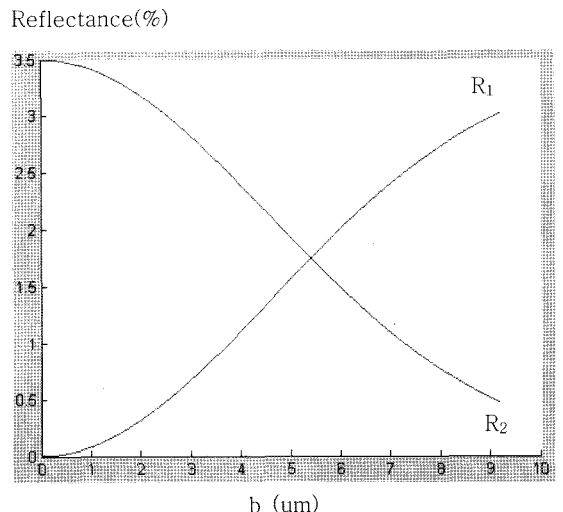


그림 2. 접속지점 및 끝 단면에서의 반사율
Fig. 2. Reflectance of a connection surface and a hollow optical fiber end.

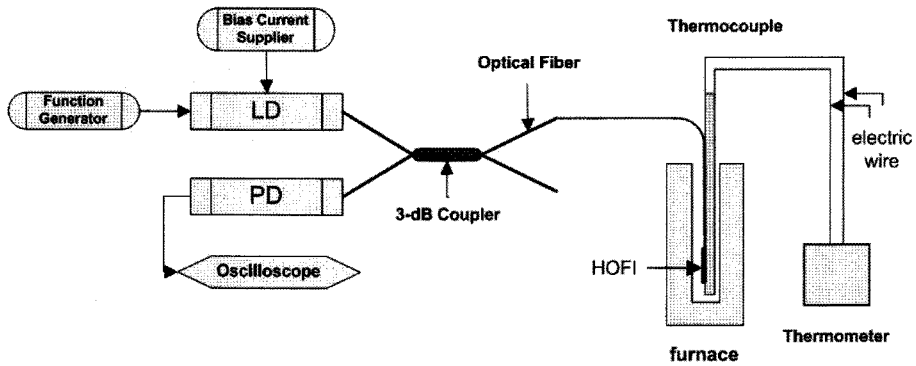


그림 3. 실험장치
Fig. 3. Experimental setup.

3. 실험결과 및 고찰

중공광섬유 간섭계를 제작하기 위해 제일먼저 SMF와 중공 광섬유의 한 단면을 깨끗하게 수직절단 함으로서 시작 된다. 그리고 깨끗하게 절단된 SMF와 중공 광섬유를 용착 접속기를 사용하여 접속시킨다. 두 광섬유를 접속시킨 후 접속지점에서 적당한 거리에 있는 중공 광섬유의 다른 끝 단면을 깨끗하게 수직 절단함으로서 중공광섬유 간섭계의 제작이 완료된다. 본 연구를 위하여 중앙에 지름이 $8\mu\text{m}$ 의 공기구멍을 가진 중공 광섬유를 이용하여 길이가 13mm , R_1 이 약 1% , R_2 가 약 0.7% 인 간섭계를 제작하였다. 이론적으로 중공 광섬유가 $8\mu\text{m}$ 의 공기구멍을 가진 경우 R_1 이 2.65% 정도의 반사율을 가져야 하나 그보다 적은 값을 가지는 이유는 접속시 접속면의 변형에 의하여 많은 손실이 발생했기 때문으로 판단된다.

중공광섬유 간섭계(HOFI)의 온도 측정 가능성을 알아보기 위하여 그림 3과 같은 실험 장치를 사용하였다. 실험 장치는 함수발생기, $1.3\mu\text{m}$ 파장의 레이저다이오드(LD), 광검출기(PD), 오실로스코프, 전류공급기, 3-dB 커플러, HOFI, 노(furnace), 열전대(thermocouple), 온도측정기(thermometer)로 구성되어 있다. 함수 발생기에서 LD로 펄스를 인가하면, 펄스 변조된 빛이 LD에서 나와 광섬유에 들어간다. 광섬유에 들어온 빛은 3-dB 커플러에서 둘로 나누어져 하나는 HOFI까지 전송되고 나머지 빛은 손실된다. HOFI에 도달한 빛은 HOFI의 두 개의 거울에서 반사되고, 반사된 빛들이 서로 간섭을 일으켜 3-dB 커플러를 거쳐 광 검출기로 들어온다. 광 검출기에 들어온 빛은 전기신호로 변환되고 변환된 전기신호는 오실로스코프에 나타난다. 본 실험에서, 함수 발생기에 의해 LD에 인가된 펄스는 주기가

70kHz , 펄스폭은 800ns , 펄스 크기는 640mV 이었고 전류 공급기에 의해 LD에 공급된 전류는 18mA 이었다. HOFI 온도센서의 특성을 조사하기 위해 HOFI를 열전대와 같이 노안에 넣어 두었고 열전대의 온도는 온도측정기를 사용하여 측정하였다. 노의 온도를 변화시키면 HOFI의 간섭계 길이와 굴절률이 변하고 이로 인하여 간섭계의 출력신호의 위상이 변하게 된다. 출력신호 위상변화로부터 온도변화를 읽어 낸다.

그림 4는 73°C 부터 75.4°C 까지 노의 온도 변화에 따른 HOFI의 출력간섭파형이다. 그림 4는 노의 온도가 73.6°C 일 때 간섭 신호의 위상이 90° , 74.2°C 일 때 180° , 74.8°C 일 때 270° , 75.4°C 일 때 360° 변화가 됨을 보여주고 있다. 위의 그림이 온도 변화에 따라 HOFI의 출력신호가 변화한다는 것을 보여주고 있으며, 출력신호가 온도변화에 코사인 함수라는 것을 알려 주고 있다. 이런 특성이 HOFI가 온도센서로서 사용이 가능함을 보여 주고 있다. 그림 5는 노의 온도를 28°C 에서 100°C 로 증가시키면서 측정한 HOFI 온도센서의 출력신호의 위상 변화량을 보여주는 그래프이다. 이 그림으로부터, 온도변화에 대한 위상변화는 거의 선형적으로 변화하였으며 개발된 센서의 온도감도는 약 $2.7\text{radians}/^\circ\text{C}$ 임을 알 수 있다. Intrinsic 페브리-페로 간섭계와 비교해 보면 공진기 길이가 1cm 인 Intrinsic 페브리-페로 온도 센서¹³는 센싱감도가 약 $0.5\text{radians}/^\circ\text{C}$ 이었다. 그래서 본 연구에서 개발된 HOFI 온도센서가 Intrinsic 페브리-페로 간섭계형 온도 센서보다 감도가 더 높음을 알 수 있다. 이는 중공 광섬유가 일반 광섬유보다 부피가 작아 온도변화에 대해 더 민감한 반응을 보이기 때문이다. 이런 실험결과들을 사용하여 온도 센서 시스템을 개발할 경우 10^{-6}°C 보다 더 적은 온도 측정도 가능할 것으로 보인다.

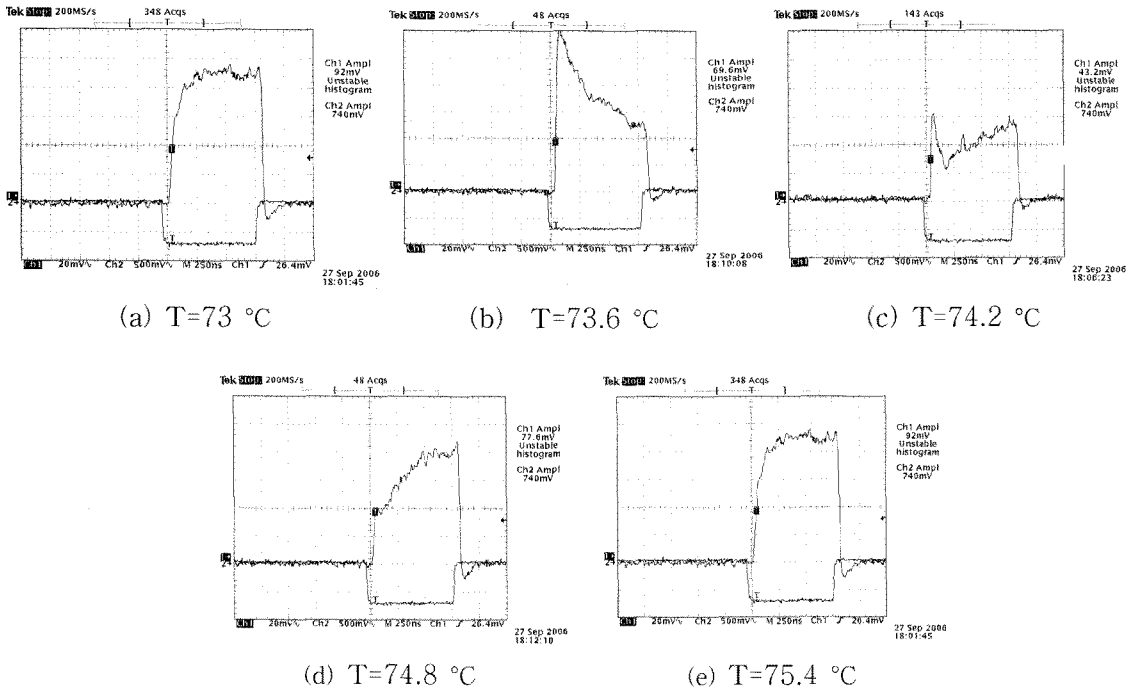


그림 4. 온도에 따른 출력신호

Fig. 4. Output signals according to the change of temperature.

4. 결 론

광섬유 페브리-페로 간섭계와 유사한 구조와 특성을 가지고 있으면서 광섬유 페브리-페로 간섭계보다 제작 공정이 간단한 HOFI를 중공 광섬유를 이용하여 제작하고 이를 온도 측정에 적용해 보았다. HOFI는 일반 통신용 단일모드광섬유(SMF)에 붙어있고, 다른 끝 단면이 수직으로 절단된 중앙에 공기구멍을 가진 중공광섬유로 구성되어 있다. 본 연구에서는, 중앙에 지름이 8um의 공기구멍을 가진 중공 광섬유를 이용하여 길이가 13 mm, 이 약 1%, R₂가 약 0.7%인 간섭계를 제작하여 온도 센서로서 사용 가능성을 알아보았다. 제작된 HOFI는 주변에 온도를 변화 시킬 경우 출력신호가 변화하였으며 출력신호의 변화는 온도의 코사인 함수 이었다. 그리고 주변 온도를 28 °C에서 100 °C로 증가시키면서 HOFI 출력신호의 위상 변화량을 측정하였는데, 주변 온도변화에 대한 위상변화는 거의 선형적 이었으며 온도감도는 약 2.7 radians/°C였다. HOPI는 intrinsic 간섭계와 비교하면 코팅공정이 필요하지 않으며 융착 접속기를 이용한 거울제작 공정도 한 번의 아크 펄스로 간단하게 제작이 가능하므로 intrinsic 간섭계와 비교하

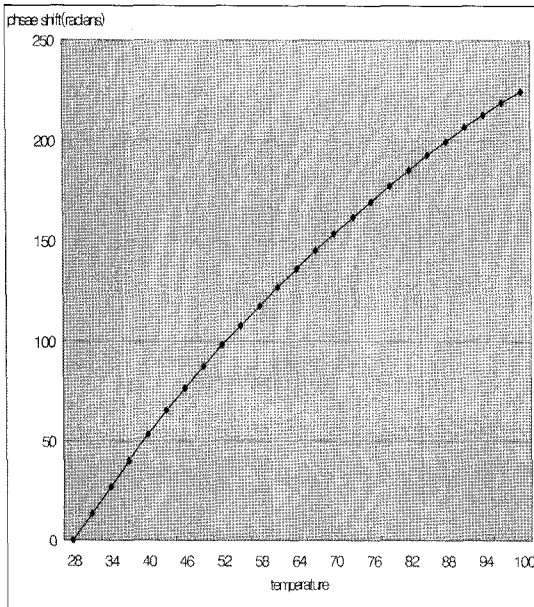


그림 5. 온도변화에 따른 간섭계의 위상변화
Fig. 5. Phase changes of the output signal according to the change of temperature.

여 제작공정이 매우 단순하다. 또한 측정감도도 intrinsic 간섭계보다 약 5.4배정도 증가하였다. HOPI는 extrinsic 간섭계와 비교하면 extrinsic 간섭계는 제작을 위해 정밀한 소자 정렬이 필요하고 간섭계의 길이도 길게 할 수 없기 때문에 한 번의 splicing 공정으로 제작이 가능한 HOPI의 제작이 extrinsic 간섭계의 제작보다 쉬우면 공진기의 길이를 더 길게 할 수 있게 때문에 extrinsic 보다 더 좋은 측정 감도를 가지고 있다. 본 연구에서 수행된 실험 결과들이 HOPI는 고감도의 광섬유 간섭계형 온도센서로서 사용 가능함을 보여 주고 있으며 앞으로 HOPI를 이용한 압력센서, 초음파 센서등을 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-01) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 박성순, 박재희, 김경찬, “소형 퓨즈에 흐르는 전류 측정용 광섬유 페브리-페로 간섭형 센서,” *센서학회지*, 제14권, 제2호, pp. 91-95, 2005.
- [2] Eric Udd, *Fiber Optic Sensors*, SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [3] C. Lee and H. Taylor, “Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors,” *Electron. Lett.*, vol. 24, pp. 193-194, 1988.
- [4] C. Lee, H. Taylor, A. Markus, and E. Udd, “Optical fiber Fabry-Perot embedded sensor,” *Opt. Lett.*, vol. 14, pp.1225-1227, 1989.
- [5] J. Dorigi, S. Krishnaswamy, and J. Achenbach, “Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection,” *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr.*, vol. 10, pp. 820-824, 2005.
- [6] A. Wang and R. Claus, “Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot dc magnetic field sensor,” *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 2115-2117, 2004.
- [7] S. Kim, J. Lee, D. Lee, and I. Kwon, “A study on the development of transmission-type extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 1869-1874, 1999.
- [8] Y. Zhang, K. Cooper, and A. Wang, “Multicavity Fabry-Perot interferometric thin-film sensor with built-in temperature compensation,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 2712-2715, 2005.
- [9] W. Tsai and C. Lin, “A novel structure for intrinsic Fabry-Perot fiber-optic temperature sensor,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 682-686, 2001.
- [10] 박재희, 광섬유 페브리-페로 간섭계, 특허0432179, 2004.
- [11] 파중호, 정우진, 김창민, “언덕형 Hollow Optical Fiber의 전계 해석,” *한국광학회지*, 제17권, pp. 493-499, 2006.
- [12] Y. Yeh, “Development of fiber-optic interferometric temperature sensor system,” Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, 1991.
- [13] Pollock, *Fundamental of optoelectronics*, Irwin, 1995.
- [14] 이경진, 이호일, 박재희, 김명규, 강신원, “철근 콘크리트 구조물에 매설된 다중화 광섬유 압력 센서,” *센서학회지*, 제8권, 제3호, pp. 232-238, 1999.
- [15] 정은주, 박재희, “스펙클 패턴을 이용한 반사형 광섬유 센서에 대한 연구,” *센서학회지*, 제13권, 제2호, pp. 121-127, 2004.



박재희

- 1984년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1995년 8월 Texas A&M 대학 전자공학과 졸업(공학박사)
- 현재 계명대학교 전자공학과 부교수
- 주관심분야 : 광섬유센서



김광택

- 1989년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 2000년 9월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학박사)
- 현재 호남대학교 전자공학과 부교수
- 주관심분야 : 광섬유센서