

폴리이미드가 코팅된 광섬유 브래그 격자를 이용한 습도센서

양재창, 김건표, 김광택^{ID}

호남대학교 대학원 전기전자공학과

Humidity Sensor Using Polyimide Film Coated Fiber Bragg Grating

Jae Chang Yang, Gun Pyo Kim, and Kwang Taek Kim

Department of Electronics Engineering, Honam University, Kwangju 62399, Korea

(Received July 20, 2023; Revised August 22, 2023; Accepted August 25, 2023)

Abstract: We have proposed and demonstrated a fiber optic RH (relative humidity) sensor based on fiber Bragg grating covered with a polyimide film. As the polyimide film absorbs the moisture in the air, its volume expands. As a result, the grating period of the FBG (fiber Bragg grating) covered with a polyimide film becomes wide and the Bragg wavelength is shifted. The sensor is implemented by fixing a 30 μm thickness polyimide film on the surface of an optical fiber grating using an adhesive, and the characteristics of the device according to humidity are analyzed. The fabricated FBG RH sensor showed a high sensitivity of 0.0186 nm/RH% and a wide measurement range from 30% to 90%. The influence of environmental temperature on the characteristics of the RH sensor was also measured and analyzed. The feasibility of commercialization is presented.

Keywords: Relative humidity sensor, Polyimide, Fiber Bragg grating

1. 서론

상대습도 센서는 정밀 가공, 반도체 제조 공정, 도장, 도금 공정, 자동화공정, 식품 가공 공정 등 산업 전반에 걸쳐 적용되고 있다. 상대습도 센서를 구현하는 여러 방법 중 광섬유는 높은 감도, 전자기 무유도성, 전자파 무간섭성, 원거리 및 다중 분포 측정 가능성, 부식 저항성 등 여러 장점이 있어 지금까지 많은 연구가 되어 왔다 [1]. 광섬유 습도 센서의 원리는 공기 중에 녹아 있는 습기에 물리적 반응을 일으키는 물질과 광섬유를 결합하여 광신호의 세기나 파장의 변화를 기초하고 있다.

광 센싱 물질로 무기물로는 TiO_2 , SiO_2 , 등이 있고, 고분

자 물질은 폴리이미드(polyimide), PMMA (polymethyl methacrylate), Gelatin, PVA (poly vinyl alcohol) 등이 알려져 있다 [1].

광섬유를 이용한 습도 센서의 구조로는 광섬유 격자형 [2], 장주기 격자형 [3], 간섭형 [4], 측면 연마형 [5] 등이 보고된 바 있다. 광섬유 격자를 이용한 습도 센서는 광섬유 격자 외부에 습기에 반응하는 물질을 코팅하여 습도 센서를 구현하는 방법이 알려져 있다.

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating)에 상용화된 폴리이미드(polyimide) 필름을 접착제로 부착하여 습도 센서로 활용하기 위한 연구를 수행하였다. 폴리이미드는 습기에 노출되면 팽창하는 특성이 있다. 제안한 습도 센서는 폴리이미드 필름의 부피 팽창에 따른 광섬유 격자의 간격 변화로 브래그 파장의 이동 현상을 이용한다.

광섬유 격자에 폴리이미드의 용액을 코팅한 구조의 습도 센서는 이미 연구된 바 있다 [6]. 기존 연구 방법에서는 폴리이미드 용액을 광섬유에 코팅 시 표면 장력으로

✉ Kwang Taek Kim; ktkim@honam.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인하여 광섬유 격자에 균일하게 코팅하기 어려운 점이 있고, 일정 이상의 두께로 균질하게 코팅하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 폴리이미드 필름을 접착제로 고정하는 간단한 방법으로 구현하였고, 실제 소자 제작에 폴리이미드 필름을 적용하였다. 실험을 통해 소자의 습도 감지 특성과 온도특성을 분석하고 특수환경에 응용가능성을 제시하고자 한다.

2. 광섬유 브래그 격자형 습도센서 구조 및 원리

제안한 광섬유 브래그 격자를 이용한 센서 구조는 그림 1과 같다. 광섬유 브래그 격자는 광섬유 코어에 주기적 굴절률의 변화를 강력한 자외선 레이저로 형성한 소자로서 다중 간섭현상으로 인하여 특정한 파장에 높은 반사 특성을 가지며 가장 높은 반사도를 가진 파장을 브래그 파장으로 부른다. 광섬유 격자의 브래그 파장은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

여기서 λ_B 는 브래그 파장(Bragg wavelength), n_{eff} 은 광섬유 유효 굴절률(effective refractive index), Λ 는 격자와 격자 사이의 간격(space between grating and grating)을 의미한다. 제안된 습도 센서는 광섬유 브래그 격자 외부에 두께 30 μm 폴리이미드 필름을 부착한 구조를 지닌다.

폴리이미드는 공기 중 수분을 흡수하면 부피가 팽창하고 굴절률이 감소하는 성질이 알려져 있다 [5]. 습도가 변함에 따라 폴리이미드 필름의 부피는 팽창 및 수축을 하고, 이로 인하여 광섬유 격자에 스트레인이 전달되어 광섬유 격자의 간격이 변화한다. 즉 습도가 변하면 브래그 파장이 이동하는 현상을 이용하여 상대 습도를 측정할 수 있다.

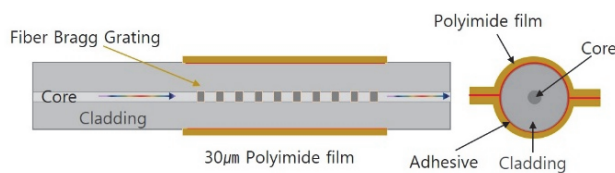


Fig. 1. Structure of proposed fiber optic humidity sensor using a fiber Bragg grating.

3. 소자 제작 및 특성 측정

3.1 소자 제작

광섬유 브래그 격자는 통신용 단일 모드 광섬유로서 외경은 125 μm 이고 코어 지름은 8.2 μm 인 단일모드 광섬유를 이용해서 제작된 소자이다. 격자가 새겨진 길이는 2.0 mm로 설정하였다. 일반적으로 격자가 새겨진 길이가 길어질수록 반사 스펙트럼의 반치폭은 좁아지고 브래그 파장에서 반사도는 높아진다. 광섬유 격자는 20 mm 간격으로 두 개를 새겼으며 두 광섬유 격자의 브래그 파장의 차이는 5 mm가 되도록 설정하였다. 두 개 중 하나의 광섬유 격자는 클래딩이 공기에 바로 노출되어 있어 습도에는 반응하지 않아 온도 검출용으로 활용할 수 있다.

습도 센서 소자 제작은 광섬유 브래그 격자를 중간에 두고 두께 30 μm 폴리이미드 필름을 상하로 놓고 순간접착제를 이용하여 부착하였다. 광섬유 브래그 격자에 폴리이미드 필름을 붙이는 과정은 중요하다. 광섬유 격자의 아래와 위를 둘러싸는 폴리이미드 필름 사이에 순간접착제가 차지하는 공간을 최소화하기 위해 필름 상·하부를 부드러운 EVA (ethylene vinyl acetate) 패드로 압착하는 방식으로 고정하였다. EVA 패드로 압착하면 상·하부 폴리이미드 필름이 광섬유 표면의 결 따라 휘어지면서 폴리이미드 필름이 광섬유 표면을 빈틈없이 고정되도록 만들어 주는 효과가 있을 것으로 예상된다. 제작된 센서 사진은 그림 2와 같다. 실제 제작된 센서는 두 개의 광섬유 브래그 격자가 연속적으로 연결된 광섬유 격자쌍을 이룬다. 하나의 광섬유 브래그 격자에는 폴리이미드 필름이 접착되어 있고 나머지 하나의 광섬유 브래그 격자에는 클래딩이 무코딩 상태로 놓아둔다. 두 광섬유 격자의 초기 브래그 파장의 차이는 5 nm로 제작하였다.

제작된 센서는 85×18×6 mm 사각 케이스에 고정하고 양쪽 길이를 각각 50 cm로 재단한 후 광원과 광스펙트럼 분석기 연결을 고려하여 FC 광 커넥터를 제작하였다. 제작된 센서 사진은 그림 3과 같다.

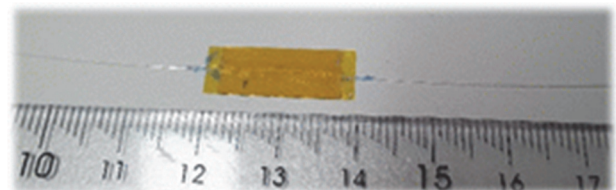


Fig. 2. Picture of fabricated humidity sensor in which a FBG is surrounded with polyimide film.

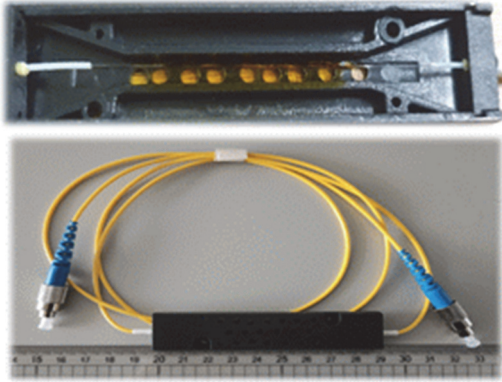


Fig. 3. Picture of device with fiber connector.

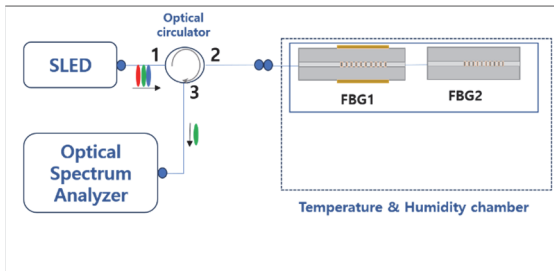


Fig. 4. Experimental set-up for humidity sensor.

3.2 특성 측정 및 평가

제작된 소자의 특성을 파악하기 위해 센서 소자를 항온 항습기에 넣고 광원과 소자를 연결 후 챔버 내 상대 습도를 변화시키면서 광스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)로 반사되는 스펙트럼을 측정하였다. 측정 장치도는 그림 4에 제시되어 있다.

그림 5는 상대 습도를 30%에서 90%까지 습도를 변화시키면서 온도 30°C, 40°C, 50°C에서 측정한 결과를 보여주고 있다. 여기서 편의상 폴리이미드가 코팅된 소자를 FBG1, 무코팅 소자를 FBG2로 이름을 붙이기로 한다.

위 그림으로 알 수 있듯이 습도가 올라가면 폴리이미드 필름이 부착된 센서 소자(FBG1)는 브래그 파장이 장파장으로 이동함을 알 수 있다. 격자 외부에 무코팅 된 소자(FBG2)는 습도에는 반응하지 않고 온도에만 반응함을 알 수 있다.

아래 그림 6은 측정된 습도 센서의 습도에 따른 브래그 파장의 변화를 측정한 결과이다. 온도가 올라가면 브래그 파장이 장파장으로 이동한 상태에서 습도에 반응함을 알 수 있다. 상대 습도가 30%에서 90%까지 증가하는 동안에 30°C에서는 1.26 nm, 40°C 약 1.12 nm, 50°C에는 1.14 nm 브래그 파장이 이동함을 알 수 있다. 제작된 센서의 습도에

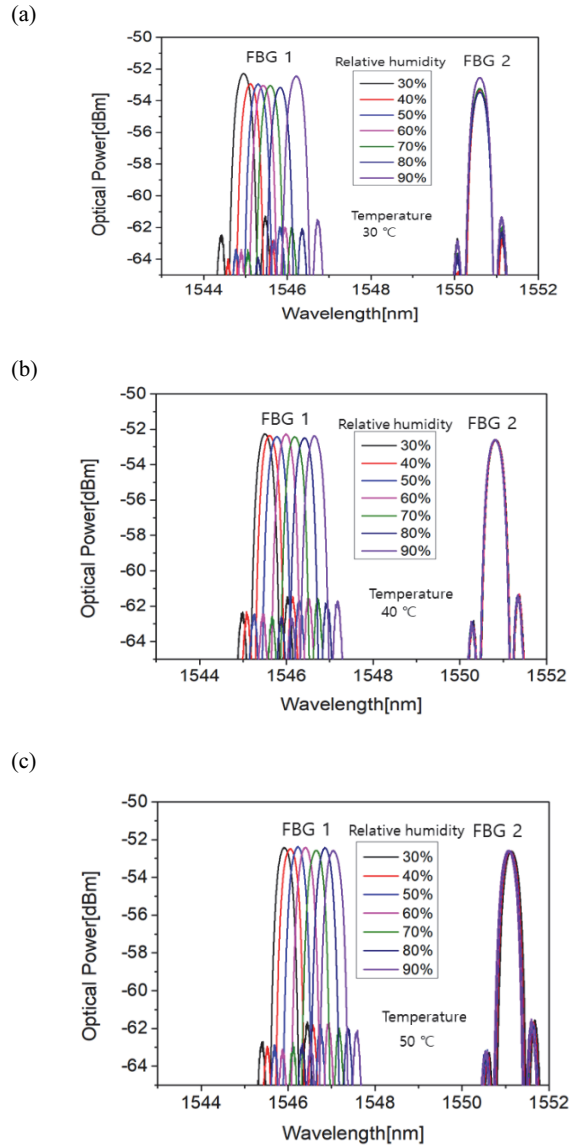


Fig. 5. The measured reflection spectrum of FBG humidity sensor, (a) at 30°C, (b) at 40°C, and (c) at 50°C.

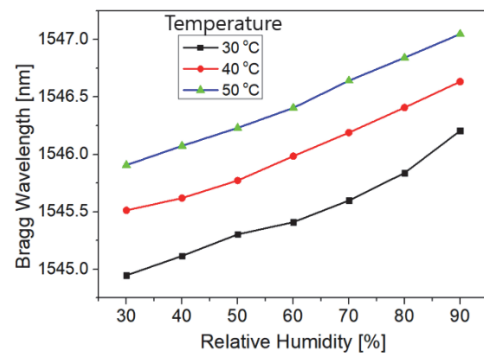


Fig. 6. Bragg wavelength shift in accordance with relative humidity.

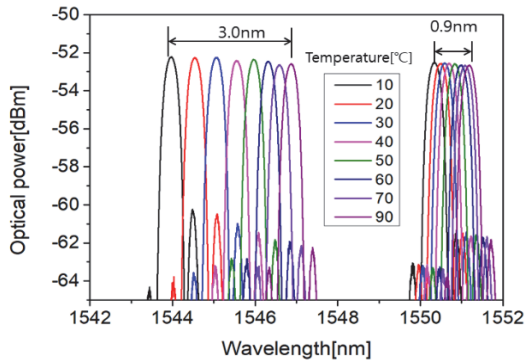


Fig. 7. Temperature characteristics of fabricated humidity sensor.

대한 브래그 파장의 감도는 최소 0.0186 nm/RH%로 측정되었다. 이는 기존의 보고된 [6] 습도 센서보다 2배 이상 높은 감도를 보인 것이다. 실험에서 측정 장비의 성능 한계로 30~90%까지 습도를 측정했지만 실제 제작된 소자의 측정 가능 범위는 그 이상 가능할 것으로 예상된다.

한편 제작된 습도 센서 소자의 온도 특성을 파악하기 위해 상대 습도를 50%로 고정하고 온도를 10°C씩 변화를 가하면 서 소자의 반사 스펙트럼을 측정하여 그림 7에 제시하였다.

80°C (10~90°C)의 온도가 변화하는 동안 브래그 파장의 변화는 FBG1은 3.0 nm, FBG2는 0.9 nm로 측정되었다. 폴리이미드가 코팅된 소자의 브래그 파장이 온도에 3배 이상 민감함을 보인다. 이런 결과는 폴리이미드가 온도에 대한 부피 팽창계수가 광섬유 자체보다 더 크기 때문으로 분석된다. 코팅이 없는 FBG2의 온도 감도는 0.011 nm/°C로서 일반적으로 알려진 수치와 거의 동일하였다 [7,8].

폴리이미드는 300°C 이상의 고온에 견딜 수 있고 매우 높은 내화학적 및 내마모성도 강해 제작된 습도 센서는 열악한 환경에서도 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 두 개의 광섬유를 쌍으로 이용하여 온도 정보를 알면 온도 보상이 가능하며 더불어 온도와 습도를 동시에 측정하는 것이 가능할 것으로 사료된다. 광섬유 브래그 격자를 이용하면 광섬유의 진동이나 구부림에 의해 출력광의 세기가 변해도 파장만 검출하면 되기 때문에 보다 안정적으로 센싱이 가능한 장점이 있다.

4. 결론

본 논문은 광섬유 브래그 격자에 폴리이미드 필름을 접착하여 습도 센서로 활용할 수 있음을 제안하고 실험으로 구현하였다. 제작된 소자의 감도는 습도 변화에 대하여 브래그 파장의 변화로 정의할 수 있으며 0.0186 nm/RH% 이상 됨을 보였다. 습도 측정 범위는 30%에서 90%까지 가능함을 확인하였다. 기존에 보고된 폴리이미드 용액을 코팅한 습도 센서 소자보다 2배 이상 높은 감도를 보였다 [6]. 제작된 습도 센서는 온도에 의존하는 특성을 보였는데, 온도 보상이 필요하며 두 개의 광섬유 격자쌍을 이용하여 하나의 광섬유 격자를 이용하여 온도 정보를 얻어 온도 보상이 가능하다. 향후 폴리이미드 필름의 두께가 소자의 특성이 미치는 영향을 분석할 계획이다

ORCID

Kwang Taek Kim

<https://orcid.org/0000-0003-1413-9452>

REFERENCES

- [1] T. L. Yeo, T. Sun, and K.T.V. Grattan, *Sens. Actuators, A*, **144**, 280 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.01.017>
- [2] L. P. Sun, J. Li, L. Jin, Y. Ran, and B. O. Guan, *Sens. Actuators, B*, **231**, 696 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.102>
- [3] G. Berruti, M. Consales, M. Giordano, L. Sansone, P. Petagna, S. Buontempo, G. Breglio, and A. Cusano, *Sens. Actuators, B*, **177**, 94 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.10.047>
- [4] F. J. Arregui, Y. Liu, I. R. Matias, and R. O. Claus, *Sens. Actuators, B*, **59**, 54 (1999).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00232-4](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00232-4)
- [5] K. T. Kim and J. C. Yang, *J. Sens. Sci. Technol.*, **32**, 51 (2023).
doi: <https://doi.org/10.46670/JSST.2023.32.1.51>
- [6] J. Zhang, X. Shen, M. Qian, Z. Xiang, and X. Hu, *Opt. Fiber Technol.*, **61**, 102406 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102406>
- [7] N. Hirayama and Y. Sano, *ISA Trans.*, **39**, 169 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(00\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(00)00012-4)
- [8] C. H. Lee, J. Lee, M. K. Kim, and K. T. Kim. *J. Korean Phys. Soc.*, **59**, 3188 (2011).
doi: <https://doi.org/10.3938/jkps.59.3188>