

# Terfenol-D 막대와 광섬유 브래그 격자를 이용한 자기장 센서 제작과 특성 측정

김광택<sup>1</sup> , 김건표<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 호남대학교 로봇드론공학과

<sup>2</sup> 호남대학교 대학원 전기전자공학과

## Fabrication and Characterization of Magnetic Field Sensor Based on Fiber Bragg Grating and Terfenol-D Bar

Kwang Taek Kim<sup>1</sup> and Gun Pyo Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Robot Drone Engineering, Honam University, Gwangju 62399, Korea

<sup>2</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate school of Honam University, Gwangju 62399, Korea

(Received December 10, 2024; Revised December 21, 2024; Accepted December 23, 2024)

**Abstract:** We have proposed and demonstrated a fiber optic magnetic field sensor using a FBG (fiber bragg grating) attached on a Terfenol-D bar. The volume of Terfenol-D is changed by the applied magnetic field due to the magnetostriction effect, as a result, the grating period of FBG varies with the intensity of the magnetic field and the Bragg wavelength of FBG is shifted. The temperature sensitivity of the sensor was measured with and without the magnetic field. The temperature sensitivity of the sensor was measured to be 0.02 nm/°C. We observed that the sensitivity of the fabricated device to magnetic field intensity was decreased with the environment temperature.

**Keywords:** Magnetic field sensor, Terfenol-D, Fiber Bragg grating, Magnetostriction effect

### 1. 서론

광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)는 광섬유 코어에 강한 자외선으로 주기적 굴절률 변화로 인하여 특정한 파장에서 높은 반사를 유도한 구조로서 외부 온도나 스트레인에 브래그 파장이 변화하는 특성을 가지며 광섬유 격자외부에 다른 물질을 코팅하여 다양한 기능을 가진 센서로 활용가능하다 [1,2]. 광섬유 브래그 격자를 이용

한 센서는 전자파 무간섭, 원격 측정, 다중화, 경량 등 많은 장점이 있다.

최근에는 광섬유 격자를 이용하여 전류나 자기장을 측정하기 위한 센서 연구가 많이 보고되고 있다 [3-8]. 이러한 자기장 센서는 기계장치의 고장 유무 진단, 내비게이션 모니터링, 드론이나 항공 장치에 이용하기 위한 연구가 보고되고 있다 [7]. 광섬유 격자와 자기 변형 효과(magnetostriction effect)를 가지는 물질과 상호작용을 이용하여 도선 주위에서 발생하는 자기장의 세기를 측정함으로써 전류량을 간접적으로 측정하는 방식이 연구되어 왔다. 자기 변형 특성을 가지는 물질은 철(Fe), 니켈(Ni), 코발트(Co), Fe-Ga 합금, Terfenol-D 등이 알려져 있다. 특히

✉ Kwang Taek Kim; [ktkim@honam.ac.kr](mailto:ktkim@honam.ac.kr)

Copyright ©2025 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.

Terfenol-D는 가장 높은 자기 변형률을 가지고 있어 음향 기기, 초음파 진단 장비, 고정밀 액추에이터에 이용되고 있다 [8].

본 논문에서는 자기 변형 효과가 가장 우수한 물질로 알려진 Terfenol-D (TbxDy1-xFe2) 물질과 광섬유 브래그 격자를 이용한 자기장 센서를 제작하고 그 특성을 측정된 결과를 보고한다. 특히 주위 온도가 센서의 특성에 미치는 영향을 깊이 분석하고 이를 통해 온도 보상 방법에 대한 논의도 제안하고자 한다.

## 2. 자기장 센서 구조 및 원리

본 논문에서 제안한 광섬유 격자를 이용한 자기장 센서의 구조는 그림 1과 같다. Terfenol-D 막대에 홈을 형성하고 그 속에 광섬유 격자를 에폭시 접착제로 부착한 구조이다.

외부의 자기장의 세기에 따라 Terfenol-D의 길이가 자기변형(magnetostriction) 효과에 의해 팽창하거나 수축한다. 이는 광섬유 격자에 간격의 변화를 유도하고 광섬유 격자의 브래그 파장이 이동하게 된다. 광섬유 격자의 브래그 파장은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

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

여기서  $\lambda_B$ 는 브래그 파장(Bragg wavelength),  $n_{eff}$ 은 광섬유 유효굴절률(effective refractive index),  $\Lambda$ 는 격자와 격자 사이의 간격(space between grating and grating)을 의미한다.

실험에 사용되는 Terfenol-D 막대는 희토류 원소인 디스프로슘(Dy), 테르븀(Tb) 및 철(Fe)을 합금시킨 재료로 소자 자체는 깨지기 쉬운 성질을 가지고 있으며 인장력에 약하지만, 압축력에는 강한 성질을 가지고 있다. Terfenol-D의 자기 변형 계수는 8~15 nm/A 정도로 알려져 최대 1,500 ppm이 보고되었다 [9].

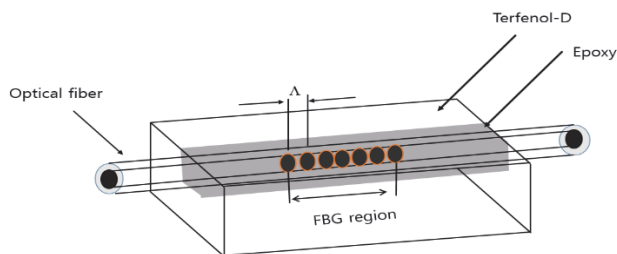


Fig. 1. Schematic Structure of proposed magnetic field sensor.

## 3. 소자 제작 및 특성 측정

### 3.1 소자 제작

소자 제작에 사용된 광섬유 격자(FBG)는 광통신용 광섬유인 SMF-28를 이용하였고 브래그 파장은 1,550 nm 부근이 되도록 제작하였다. 광섬유 격자가 새겨진 길이는 2.0 mm이다. Terfenol-D (TbxDy1-xFe2) 막대는 길이 13 mm, 폭과 높이 각각 4 mm의 크기를 가진다. 막대의 한쪽 면에 0.3 mm 폭의 홈을 길이 방향으로 형성하고 홈속에 광섬유 격자를 에폭시 접착제로 고정한다. 이때 광섬유 브래그 격자가 Terfenol-D 막대의 끝단 부분에 놓이도록 제작하였다. 제작된 소자의 사진은 아래 그림 2에 제시되어 있다.

### 3.2 특성 측정 및 분석

제작된 소자의 특성을 파악하기 위해 그림 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. 자기장의 발생을 위해 네오디뮴 자석을 이용하였다. 센서에 가해지는 자기장의 세기는 네오디뮴 자석과 광섬유 격자 사이의 이격 거리를 조절하여 제어하였다. 센서 소자에 가해지는 자기장의 세기는 광섬유 격자와 최소한의 거리에 Hall 센서 소자를 부착하여 모니터링하고, 온도 영향을 분석하기 위해 광섬유 격자 센서 위에 온도 센서를 부착하였다. 실험 장치를 가열 냉각이 모두 가능한 온도 제어 장치 위에 올려놓고 센서에 가해지는 온도를 제어하였다.

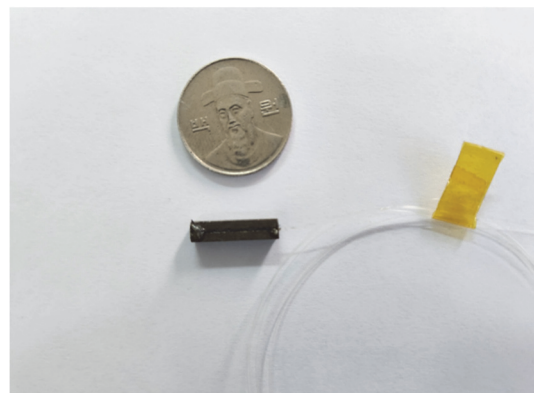


Fig. 2. Picture of fabricated magnetic field sensor using Terfenol-D bar and fiber Bragg grating.

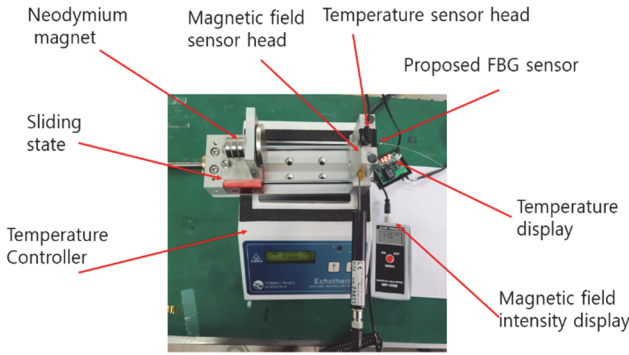


Fig. 3. Experimental set-up for fabricated magnetic field sensor.

그림 4는 자기장을 가하기 전 제작된 센서 소자의 온도에 따른 영향을 측정된 결과이다. 주위 온도에 따른 소자의 반사 스펙트럼을 광스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)로 측정할 것이다. 온도가 증가함에 따라 브래그 파장이 장파장으로 이동하는 것을 관측하였다. 온도를 10°C에서 시작하여 60°C까지, 10°C 단위로 변화시키면서 브래그 파장의 변화를 측정할 결과 약 1.2 nm 이동함을 확인하였다. 즉 단위 온도 변화에 대해 0.02 nm/°C로 측정된 것이다. 이는 광섬유 격자 자체의 온도 감도인 0.01 nm/°C의 2배 정도인 것으로 측정되었다 [11]. 이러한 원인은 Terfenol-D의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)는 약  $12.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  [12]로 광섬유 자체의 열팽창 계수( $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) 보다 훨씬 높기 때문이다. 실제로 Terfenol-D의 열 팽창계수가 광섬유 재질인 실리카 보다 10배 이상 크지만, Terfenol-D에 고정된 광섬유 격자의 온도 감도는 Terfenol-D 재질의 열팽창계수와 비례하지 않는다는 사실을, 실험을 통해 알 수 있었다.

다음으로 자기장의 세기에 따른 브래그 파장의 변화를 측정하였다. 이 경우에도 자기 변형효과가 온도에 영향을 받을 수 있어 주위 온도를 변화시키면서 측정하였다. 그림 5는 10°C에서 자기장의 세기에 따른 브래그 파장의 변화를 측정할 결과이다. 이론적 예측과 마찬가지로 자기장 세기가 증가하면 Terfenol-D 막대가 팽창하여 브래그 파장이 장파장 방향으로 이동함을 알 수 있다. 처음 낮은 자기장 세기에서는 소자의 브래그 파장의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이러한 현상은 Terfenol-D의 고유한 현상으로 알려져 있다. 반응은 선형적인 특성을 보이지 않지만, 자기장의 세기가 40 kA/m 이상에는 비교적 선형적 특성을 보였기 때문에 전류 센서로 활용할 때 선형적인 특성을 얻기 위해서 바이어스 자기장을 가하는 방법도 고려해볼 필요가 있다.

그림 6은 온도 제어 장치로 제작된 자기장 센서에 대해

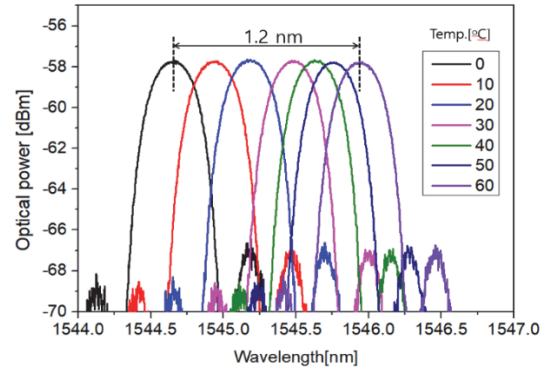


Fig. 4. Measured reflection spectrum of magnetic field sensor in accordance with temperature variation.

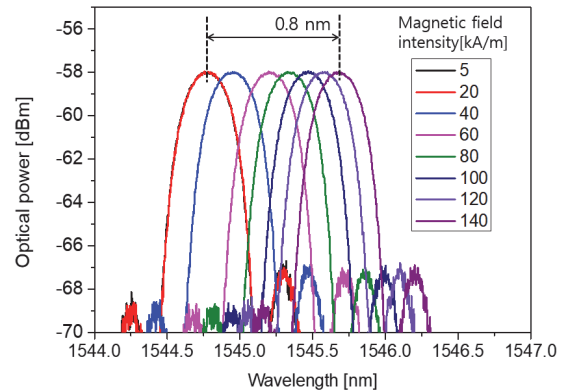


Fig. 5. Measured reflection spectrum of magnetic field sensor in accordance magnetic field intensity.

지는 온도를 조절하면서 센서의 브래그 파장의 이동을 측정할 결과이다. 측정 결과 10°C와 20°C에서는 자기장의 세기에 따른 브래그 파장의 이동 패턴이 거의 유사하였다. 이때 감도는 선형구간에서 평균 8.0 pm/(kA/m)로 측정되었다. 하지만 30°C 이상에서는 감도가 낮아지는 현상을 보였다. 이는 온도가 올라가면 Terfenol-D의 자기변형 계수가 감소하는 현상 [13] 때문으로 분석된다.

제작된 소자는 약간의 히스테리 증상을 보였으나 이러한 현상은 이미 잘 알려져 있기 때문에 본 논문에서는 다루지 않았다.

실험을 통해 센서의 온도 의존성은 두 가지 원인으로 분석할 수 있다. Terfenol-D의 열팽창에 의한 효과와 Terfenol-D의 자기 변형 효과의 온도 의존성에 의한 효과이다. 온도 보상을 위해서는 두 개의 광섬유 격자를 이용하여 하나의 광섬유는 온도를 모니터링하고 열 팽창 효과와 자기 변형효과의 온도 의존성 동시에 제거해야 한다. 이러

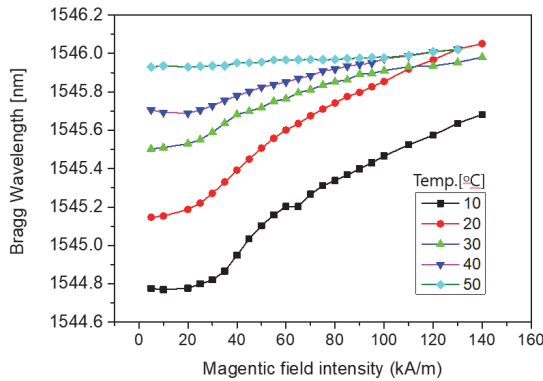


Fig. 6. Measured Bragg wavelength shift vs. magnetic field intensity under various temperatures.

한 센서의 온도 의존성을 해결하기 위해서는 필터 효과 를 가진 항온 장치를 부착해서 일정한 온도에서 동작하도 록 하는 방법이 있을 수 있겠다. 한편, 낮은 자기장 세기에서 낮은 감도와 비선형성을 개선하기 위해 전류 센서로 활용 시 외부에서 영구자석으로 일정하게 바이어스 자기장을 인가하는 방법이 있을 수 있겠다.

#### 4. 결론

제안된 자기장 센서는 온도에 의존하는 특성이 있는데 두 가지 특성을 고려해야 한다. 광섬유 격자가 가지는 온도 의존성과 Terfenol-D가 가지는 온도 의존성을 모두 고려 해야 한다. 실험 결과 Terfenol-D에 고정된 광섬유 격자 고유의 온도 민감도는 광섬유 격자 고유의 값보다 2배 이상 크게 나타났다. 이는 Terfenol-D의 열팽창 계수가 광 섬유 재질보다 더 큰 것 때문으로 분석되었다. 여러 온도에서 자기장의 세기에 따른 광섬유 격자의 브래그 파장의 이동을 측정된 결과, 상대적으로 낮은 온도에서는 높은 감도를 가지는 것으로 측정되었으나 온도가 높을수록 감도가 감소하는 현상을 확인하였다.

본 논문의 실험 결과는 Terfenol-D를 이용한 자기장 센서의 온도 특성을 이해하고 온도 보상 기법 개발에 도움이 될 것으로 생각된다.

#### ORCID

Kwang Taek Kim

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

#### REFERENCES

- [1] J. C. Yang, G. P. Kim, and K. T. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 594 (2023). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.9>
- [2] K. T. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 513 (2015). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.8.513>
- [3] D. Satpathi, A. Moore, and M. G. Ennis, *IEEE Sens. J.*, **5**, 1057 (2005). doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.850996>
- [4] S.M.M. Quintero, A. M. B. Braga, H. I. Weber, A. C. Bruno, and J.F.D.F. Araújo, *Sens.*, **10**, 8119 (2010). doi: <https://doi.org/10.3390/s100908119>
- [5] H. Liu, S. W. Or, and H. Y. Tam, *Sens. Actuators, A*, **173**, 122 (2012). doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.11.005>
- [6] A. O. Cremonnezi, E. C. Ferreira, A. J. B. Filho, and J. A. Siqueira Dias, *IEEE Sens. J.*, **13**, 693 (2013). doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2226333>
- [7] J. Han, H. Hu, H. Wang, B. Zhang, X. Song, Z. Ding, X. Zhang, and T. Lui, *J. Lightwave Technol.*, **35**, 4910 (2017). doi: <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2766119>
- [8] S. Xu, Q. Peng, C. Li, B. Liang, J. Sun, F. Xing, and H. Xue, *Appl. Sci.*, **11**, 160 (2021). doi: <https://doi.org/10.3390/app11010161>
- [9] S. Ma, H. Wu, S. Gao, M. Sun, H. Song, and Q. Wang, *Nanomater.*, **13**, 2109 (2023). doi: <https://doi.org/10.3390/nano13142109>
- [10] C. H. Lim, T. Y. Chung, S. J. Jun, and B. Y. Kim, *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, **13**, 308 (2003). doi: <https://doi.org/10.5050/KSNVN.2003.13.4.308>
- [11] D. H. Kim and C. M. Lee, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **28**, 3983 (2011). UCI: G704-000101.2011.28.4.016
- [12] J. C. Yang, G. P. Kim, and K. T. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 595 (2023). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.9>
- [13] Y. Liang and X. Zheng, *Acta Mech. Solida Sin.*, **20**, 283 (2007). doi: <https://doi.org/10.1007/s10338-007-0733-x>