《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 34, No. 2, April 2023, pp. 72-75
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2023.34.2.072
ISSN:1225-6285(Print)
ISSN:2287-321X(Online)

Current Sensor for Bus Bar based on Fiber Bragg Gratings

Kwang Taek Kim† and Gunpyo Kim

Department of Electronic Engineering, Honam University, Gwangju 62399, Korea

(Received February 24, 2023; Revised March 13, 2023; Accepted March 16, 2023)

In this paper, a fiber-optic current sensor for a bus bar conductor based on the fiber Bragg grating (FBG) is proposed and demonstrated experimentally. The metal bus bar and a magnet are connected to each other through an FBG and the Bragg wavelength of the FBG is changed by magnetic force between the two connected devices. The experimental results showed that the Bragg wavelength of an FBG shifted by 650 pm as the 500 A direct current was applied to the bus bar.

Keywords: Bus bar, Current sensor, Fiber Bragg grating, Magnetic force
OCIS codes: (050.2770) Gratings; (280.4788) Optical sensing and sensors

광섬유 브래그 격자를 이용한 부스바용 전류 센서

김광택† · 김건표

호남대학교 전자공학과
㉾ 62399 광주광역시 광산구 호남대길 112

(2023년 2월 24일 받음, 2023년 3월 13일 수정본 받음, 2023년 3월 16일 게재 확정)

본 논문에서는 500 A용 bus bar에 적용할 수 있는 광섬유 브래그 격자를 이용한 전류 센서를 제안하여 실험으로 구현하였다. Bus bar와 영구자석을 광섬유 격자로 연결하여 전류 인가 시, 연결된 두 소자 사이에서 발생하는 자기력에 의해 광섬유 브래그 격자의 브래그 파장이 변하게 된다. 실험 결과 500 A 직류 전류를 인가 시 브래그 파장은 650 pm의 변화를 보였다.

Keywords: 부스바, 전류 센서, 광섬유 격자, 자기력
OCIS codes: (050.2770) Gratings; (280.4788) Optical sensing and sensors

I. 서 론

전류 센서는 전력 모니터링이나 과전류로 인한 사고 예방 목적으로 배전 계통, 변압기, 태양광 발전기 등 다양한 분야에 필요하다. 기존 대전류 센서로 사용되던 권선형 전류 센서는 고압일수록 긴 절연 거리가 필요하고, 권선 수가 많을수록 무겁고 부피가 커져 설치 공간이 좁을 경우 사용에 어려움이 있다. 반면 Hall 효과를 이용한 반도체형 전류 센서는 센서의 크기는 작지만, 능동형 소자로 센서에 전원을 연결해야 하며 전류 신호도 전기신호로 받아야 해서 전자파 간섭에 노출되기 쉽다.

최근 광섬유를 이용한 전류 센서가 높은 절연 특성, 전자파 무간섭성, 원거리 측정 특성 등으로 기존 전기전자식 전류 센서의 대체제로 주목받고 있다. 이러한 광전류 센서의 구현 방법으로 자기광학 소자의 패러데이 효과를 이용하는 방법[1-4]과 광섬유 고유의 패러데이 효과를 이용하는 방법[5-7]이 잘 알려져 있다. 또한 자기 탄성 물질에 광섬유 격자를 결합한 전류 센서[8,9], 자석과 솔레노이드 사이의 자기력을 광섬유 격자를

†Corresponding author: ktkim@honam.ac.kr, ORCID: 0000-0003-1413-9452
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © 2023 Korean Journal of Optics and Photonics

이용하여 측정하는 방식의 전류 모니터링 방법도 연구된 바 있다[10]. 광센서를 구현하는 여러 방법 중 광섬유 격자를 이용하면 높은 정확성, 다중화 등 많은 장점이 있다. 광섬유 격자는 광섬유 코어 내에 주기적, 혹은 비주기적 굴절률 변화로 특정한 파장이 높은 반사 특성을 가지는 소자로서 온도와 스트레인에 의해 브래그 파장이 변화하는 특성이 있다.

본 논문에서 제안된 전류 센서는 부스바(bus bar)와 영구자석 사이에 광섬유 격자가 연결된 구조를 지닌다. 부스바에 전류가 인가될 때, 부스바와 자석 사이에 자기력이 작용하고 결과적으로 광섬유 격자에 스트레인이 전달된다. 이에 따라 광섬유 격자의 브래그 파장에 변화가 나타난다. 배전반에 주로 설치되는 부스바 크기와 형태는 전류 용량에 따라 다양하며, 본 논문에서는 500 A용 부스바를 이용하여 전류 센서를 구현하였다. 본 논문에서 제안한 센서는 구조가 간단하고 약간의 크기 변화를 통해 다양한 금속 부스바에 적용한 가능한 전류 센서로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

II. 센서 구조 및 작동원리

대전류용 부스바(bus bar)에 흐르는 전류를 모니터링하기 위한 센서 구조는 그림 1과 같다. 최대 500 A까지 허용이 되는 구리 부스바를 고려하였으며, 영구자석과 부스바 사이에 하나의 광섬유 격자가 팽팽히 연결되어 있고 다른 하나의 광섬유 격자는 자유로운 상태로 연결되어 있다. 광섬유 격자(fiber Bragg grating)의 구조와 광학적 작동원리는 잘 알려져 있으므로 본 논문에서는 이를 다루지 않기로 한다.

그림 2에 나타나 있듯이 부스바에 흐르는 전류에 의해서 발생하는 자기장과 영구자석에서 발생하는 자기장이 같은 방향일 때 척력이, 반대 방향일 때 인력이 작용한다. 영구자석은 네오디뮴 자석으로 자기장의 방향[11]은 제조사가 제공한 자료를 참조하였다. 부스바와 자석 사이에 작용하는 자기력에 의해 광섬유 격자 FBG 1에 스트레인이 인가되어 브래그 파장이 이동하게 된다. FBG 2는 전류 작용과 무관하게 작용하며 부스바에 온도를 측정하여 온도 보상용으로 활용할 수 있다. 실제 전류 값은 두 광섬유 격자의 브래그 파장의 차이를 이용하여 구할 수 있다.

본 논문에서는 부스바와 영구자석 사이에 작용하는 자기력 세기와 부스바에 인가한 전류와의 상호 작용에 대한 정량적 해석은 수행하지 않았다. 다만 부스바와 영구자석 사이에 작용하는 힘은 간접적으로 측정할 수 있는데, 광섬유 격자에 인가되는 장력과 광섬유 격자의 브래그 파장의 변화 관계로 알 수 있다. 본 논문에 사용한 광섬유 격자에 일정한 장력을 가해 브래그 파장(Bragg wavelength)의 변화를 예비적으로 측정해 본 결과, 감도는 대략 14 nm/N으로 측정되었다.

III. 전류 센서 제작 및 특성 평가

그림 3은 설계 및 제작된 센서의 구조이다. 길이 30 mm, 폭 10 mm, 두께 5 mm인 네오디뮴 자석이 실험에 이용되었다. 부스바의 폭은 40 mm, 두께는 5 mm이다. 케이스 재질은 ABS이다. 전류가 부스바에 인가 시 자석이 부스바로부터 멀어지는 방향으로 힘이 작용하도록 설계하였으며, 자석이 자기력에 의해 미세하게 움직일 수 있도록 0.2 mm의 이격 공간이 형성되어 있다.

그림 4는 500 A까지 지원되는 직류 전류원을 부스바 양단에 연결하여 센서 특성을 측정하기 위한 장치 사진이다. 큰 전류를 장시간 가하면 케이블이나 접속부에 과열이 발생할 수 있어서, 전류를 수 초 동안 가하고 난 뒤 센서 응답을 측정하고 이어 전류를 차단하여 일정 시간 경과한 후 다시 전류를 인가하는 방식으로 특성을 측정하였다. 전류를 변화시키면서 광스펙트럼 분석기로 반사 스펙트럼의 변화를 측정하였다.

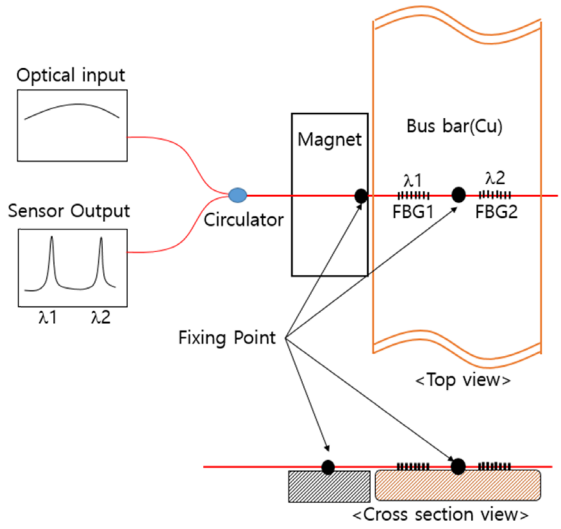

Fig. 1. Schematic structure of the proposed current sensor for a bus bar conductor.

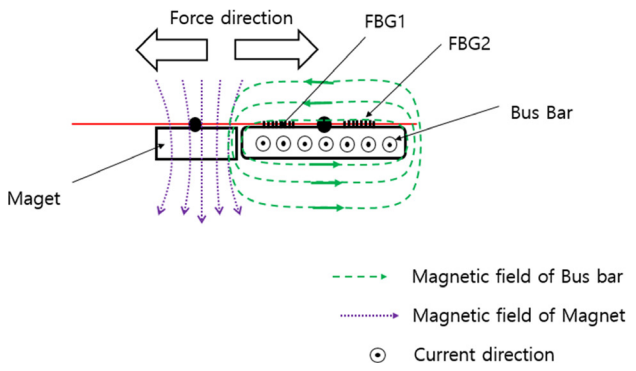

Fig. 2. Magnetic field profile and magnetic force direction around the proposed sensor.

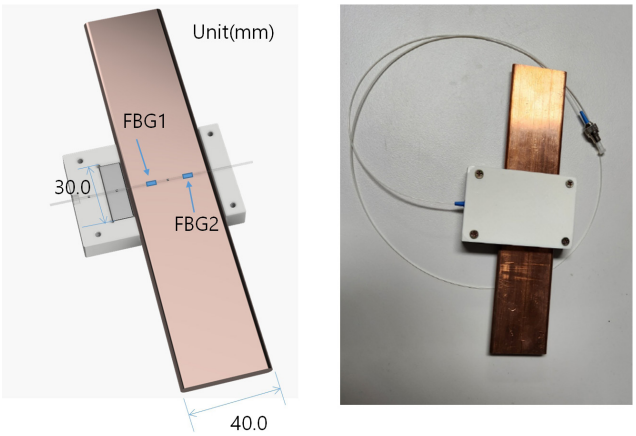

Fig. 3. Designed current sensor structure (left) and picture of fabricated current sensor (right).

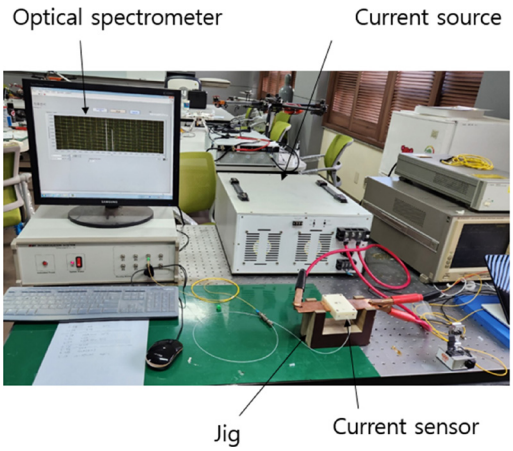

Fig. 4. Experimental set-up for testing of the fabricated current sensor.

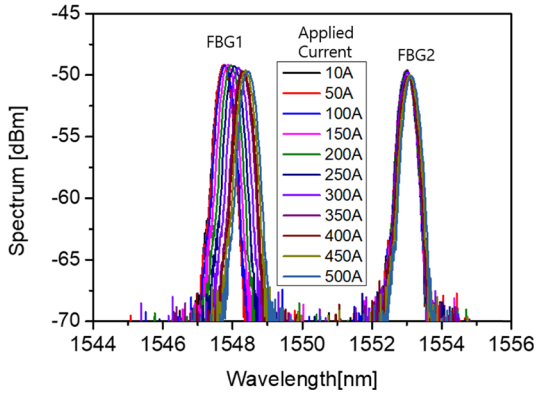

Fig. 5. Change of the reflection spectrum of the current sensor in accordance with applied current.

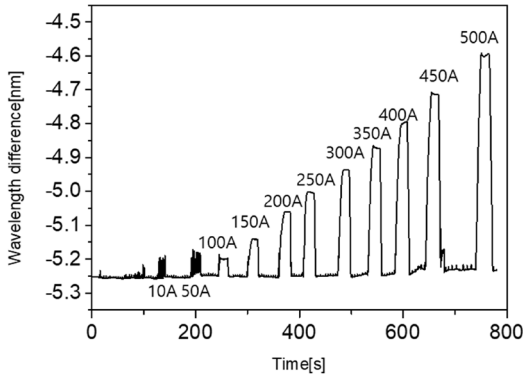

Fig. 6. Variation of the difference between two Bragg wavelengths in accordance with applied current.

그림 5는 제작된 전류센서의 부스바에 직류 전류를 500 A까지 순차적으로 증가시키면서 두 브래그 격자의 반사 스펙트럼을 광 스펙트럼 분석기로 측정한 결과이다. 전류의 방향은 자석과 부스바가 서로 척력이 작용하는 방향으로 인가하였다. FBG 1의 브래그 파장은 전류가 10 A로 시작하여 500 A까지 증가하는 동안 약 0.65 nm만큼 장파장으로 이동함을 알 수 있다. 이는 자기력에 의해 부스바와 자석 사이에 작용하는 힘이 대략 500 A 인가될 때 0.046 N의 힘이 작용함을 의미한다.

한편 FBG 2의 브래그 파장은 전류를 500 A 증가하는 동안 장파장으로 0.1 nm 가량 이동하는 현상을 보이는데, 이는 큰 전류에 의해서 부스바에 열이 발생하기 때문으로 분석된다. 이러한 열적 효과를 제거하기 위해서는 온도 보상이 필요하며, 온도 보상을 위해 두 광섬유 격자의 브래그 파장의 차이를 이용하는 방법을 사용한다. FBG 1의 브래그 파장이 전류의 영향뿐만 아니라 온도에 영향을 받는 것을 제거하기 위해서 FBG 2가 필요하다. FBG 1이 온도 변화에 의한 파장 변화를 FBG 2를 통해 보상하는 방법이다. 즉, 두 브래그 파장의 차이를 이용해서 전류를 측정하고 FBG 1의 브래그 파장을 이용하여 부스바의 표면 온도를 동시에 측정할 수 있다. 실질적으로 FBG 2를 이용하면 부스바의 과열을 모니터링하는 용도로 활용할 수 있다.

그림 6은 인가전류에 따른 두 광섬유 격자의 브래그 파장의 차이를 광 인터로게이터로 측정한 결과를 보여주고 있다. 이 실험에서 큰 전류를 연속적으로 가하면 높은 열이 발생하기 때문에 전류원의 on/off를 반복하는 방법으로 전류에 대한 센서의 반응을 측정하였다. 50 A 이하에서 인가되는 전류원의 전류 값은 시간 상에서 안정되지 못하여 흔들렸으며 이로 인하여 두 브래그 파장의 차이값 또한 안정되지 못함을 보여주고 있다. 인가전류 100 A 이상에서 전류 값은 안정적 특성을 보였으며, 인가 전류량에 따른 두 브래그 파장 차이가 선형적 변화를 보임을 알 수 있다.

그림 7은 실험으로 얻은 데이터를 선형 근사로 곡선으로 비교 분석한 그림으로 전류와 두 브래그 파장의 차이의 관계를 보여주고 있다. $y = ax + b$의 형태로 선형 근사시킬 때 a = 0.00138, b = −5.34367이며 표준편차는 0.01441이다.

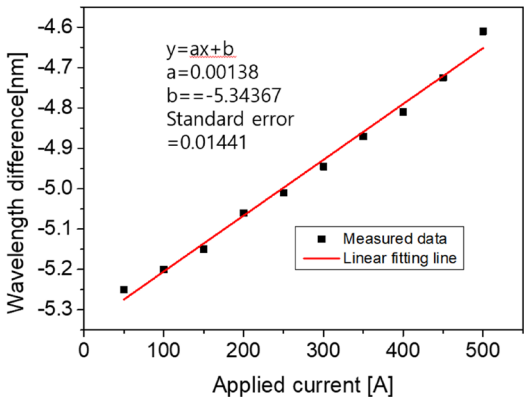

Fig. 7. Analysis of measured data for the relationship between the applied current and the wavelength difference.

IV. 결 론

본 논문에서는 부스바 형태의 구리선에 흐르는 전류를 광섬유 격자를 이용하여 측정할 수 있는 센서 구조를 제안하였다. 부스바와 자석 사이에 작용하는 자기력을 광섬유 격자에 전달하여 브래그 파장의 변화를 이용하는 방식으로, 실제 500 A까지 전류를 인가하여 0.65 nm의 브래그 파장의 변화를 확인할 수 있었다. 제안된 센서는 두 개의 광섬유 격자가 쌍으로 형성되어 있고 온도를 보상하는 기능과 과열을 모니터링할 수 있는 기능이 포함된 센서 구조이며, 전류센서는 큰 전류가 발생하는 직류 전류를 모니터링하는 용도로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

재정지원

한국산업단진공단 단년도 이전기술 사업화 R&D (IRGJ2113).

이해상충

저자는 본 논문과 관련된 어떠한 이해 충돌 사항도 없었음을 밝힌다.

데이터 가용성

본 연구의 결과 분석 및 생성된 데이터는 모두 본 논문 내 명시되어 있으며 공공의 이용이 가능하다. 데이터에 접근하거나 사용하고자 하는 이는 저자에게 타당한 이유를 밝히고 허가를 통해 사용할 수 있다.

References

1. K. T. Kim, D. W. Chung, and Y. S. Kim, “Implantation of DC optical current sensor based on Faraday effect for HVDC,” J. Sens. Sci. Technol. **20**, 87-190 (2019).
2. J.-I. Jeon, J.-S. Lee, S.-J. Song, C.-W. Jung, W.-Z. Park, K.-S. Lee, J.-B. Kim, and M.-S. Kim, “The study of the optical current sensor using magneto-optic effects,” J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng. **17**, 47-53 (2003).
3. C. S. Yang, M. H. Song, S. J. Ahn, B. S. Park, and B. H. Lee, “Fiber optic current sensor using Faraday effect,” Proc. KIEE Conf. 38-40 (2011).
4. M. H. Song, C. S. Yang, S. J. Ahn, B. S. Park, and B. H. Lee, “Fiber-optic current transformer for the over current protection relay,” J. Korean Soc. Nondestruc. Test. **21**, 542-548 (2001).
5. J.-H. Lee, H.-S. Kang, J.-T. Song, and K.-S. Lee, “Stabilization of the Sagnac optical fiber current sensor with automatic active-twist control,” J. Opt. Soc. Korea **2**, 34-37 (1998).
6. Fibercore, “Fiber optic current sensors & optical current transformers,” (Fibercore), https://fibercore.humaneticsgroup.com/perspectives/2020/07/17/fiber-optic-current-sensors-and-optical-current-transformers (Jan. 18, 2003).
7. ABB Switzerland, “FOCS-fiber-optic current sensor: Make light work of DC current measurement,” (ABB Switzerland Ltd., Published date: 2011), https://library.e.abb.com/public/74d5555d2a9c2998c12579a00038ff0a/FOCS_brochure_3BHS362996_E01.pdf (Jan. 18, 2023).
8. S. Xu, Q. Peng, C. Li, B. Liang, J. Sun, F. Xing, H. Xue, and M. Li, “Optical fiber current sensors based on FBG and magnetostrictive composite materials,” Appl. Sci. **11**, 161 (2021).
9. D. Davino, C. Visone, C. Ambrosino, S. Compopiano, A. Cusano, and A. Cutolo, “Compensation of hysteresis in magnetic field sensors employing fiber Bragg grating and magnetoelastic materials,” Sen. Act. A **147**, 127-136 (2008).
10. D. H. Kim and S. H. Kim, “Monitoring of electric current by using a fiber Bragg grating sensor,” J. Korea Soc. Nondestruc. Test. **37**, 257-261 (2017).
11. Daonmagnet, “Neodymium magnet,” (Daonmagnet), https://domagnet.co.kr/product/detail.html?product_no=16&srvc_anl=gcs_ssc_c000000872&gclid=Cj0KCQjw2v-gBhC1ARIsAOQdKY22c6hcYRmjq9dlu5748F6qL0WEu2Xf7hcB42SJ4c4dBJjNkXfntzMaAieiEALw_wcB (Jan. 18, 2003).