

복굴절이 큰 광섬유에 제작된 장주기 광섬유 격자를 이용한 광섬유 전류 센서

論 文

56-10-21

Fiber-optic Current Sensor Using a Long-period Fiber Grating Inscribed on a High Birefringent Fiber

李 鎔 旭[†]

(Lee Yong Wook)

Abstract Based on Faraday effect, the variation of current flowing through the conductor can be encoded as that of azimuth angle of light polarization propagating through the fiber coil wound onto the conductor. The amount of current can be obtained by measuring the variation of the light intensity transformed from that of the azimuth angle through a polarization analyzer. In this paper we propose a fiber-optic current sensor system that employs a fiber polarization analyzer as a sensor interrogation device. The fiber polarization analyzer was prepared by inscribing a long-period fiber grating on a high birefringent fiber. At the fixed wavelength of 1522.5 nm, the fabricated fiber device has the polarization extinction ratio of more than 25 dB. The measurement of large current up to 600 Arms was accomplished based on a simple fiber interrogation device and the measurement output of the sensor system showed a good linearity.

Key Words : Optical Fiber Sensor, Current Sensor, Long-Period Fiber Grating, High Birefringent Fiber

1. 서 론

광섬유 전류 센서 (fiber-optic current sensor) 는 Smith가 광섬유를 이용한 전류 측정의 원리를 처음으로 구현한 이후, 그 연구 개발에 있어 수많은 노력이 투자되어 왔다 [1-3]. 현재까지 복굴절이 큰 광섬유 (high birefringent fiber; 이하 HBF) 나 연유리 (flint glass) 광섬유, 그리고 Sagnac 간섭계 구조 등을 이용하여 수많은 광섬유 전류 센서들이 개발되어 왔다 [4-6]. 일반적으로 광섬유 전류 센서는 전류가 흐르는 도선 주위를 감을 수 있는 광섬유 코일 (coil) 과 광원, 그리고 편광 분석기 (polarization analyzer) 로 구성된다. 광섬유를 통해 진행되는 빛의 편광축 (plane of polarization) 은 Faraday 효과에 의해 빛이 진행되는 방향으로 인가되는 자기장의 세기에 비례하여 회전하게 된다. 여기서 자기장의 세기는 흐르는 전류의 양에 비례하므로 결과적으로 도선에 흐르는 전류량에 비례하여 광섬유를 진행하는 빛의 편광축 회전량이 결정된다. 따라서, 도선을 감은 광섬유 코일에서 출력되는 빛을 편광 분석기를 통과시켜 편광축이 회전한 양을 계산함으로써 진행되는 빛에 가해진 자기장의 세기를 알 수 있고, 이를 통해 도선에 흐르는 전류의 양을 계산할 수 있는 전류 센서의 인터로게이션 (interrogation) 이 가능 하다. 본 논문에서는 광섬유로 구성되는 간단한 구조의 광섬유 편광 분석기를 센서 인터로게이션 소자로 사용한 광섬유 전류 센서 시스템을 제안한다. 광섬유 편광 분석기는 HBF에 장주기 광섬유

유 격자 (long-period fiber grating; 이하 LPFG) 를 형성함으로써 제작되었다. 제작된 복굴절이 큰 LPFG (high birefringent LPFG; 이하 HB-LPFG) 는 HBF의 복굴절 (birefringence) 특성과 LPFG의 모드 결합 (mode coupling) 특성 때문에, 특정한 파장에서 광섬유 편광 분석기의 특성을 가지게 된다 [7,8]. 간단한 구조의 광섬유 편광 분석기를 사용한 제안된 광섬유 전류 센서를 이용하여 600 Arms까지 전류 측정을 수행하였고, 센서 시스템의 출력이 만족할만한 선형성을 가짐을 보였다.

2. HB-LPFG를 이용한 전류 센서 인터로게이션

우선 HB-LPFG의 스펙트럼 (spectrum) 특성에 대해 조사해보기로 한다. LPFG에서의 코어 모드 (core mode) 와 클래딩 모드 (cladding mode) 의 동일 방향 모드 결합 (codirectional mode coupling) 에서 공진 파장 (resonant wavelength) λ_0 는 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\lambda_0 = [n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad}] \Lambda$$

여기서, n_{eff}^{core} 와 n_{eff}^{clad} 는 각각 코어와 클래딩의 유효 굴절률 (effective refractive index) 이고, Λ 는 LPFG의 격자 주기 (grating period) 이다. HBF의 경우, 도파로 (waveguide) 의 비대칭적인 구조가 HBF의 코어를 진행하는 두 선형 편광된 (linearly polarized) 모드들의 굴절률들 사이에 차이가 발생하도록 만든다. (클래딩을 진행하는 모드의 경우도 마찬가지이다.) 다시 말해, HB-LPFG에서는 입력되는 빛의 편광 상태에 따라, 위의 식으로 주어지는 LPFG 결합 조건을 만족시키는

[†] 교신저자, 正 會 員 : 韓國電子通信研究員 先任研究員

E-mail : dorawoot@chol.com

接受日字 : 2007年 8月 3日

最終完了 : 2007年 8月 20日

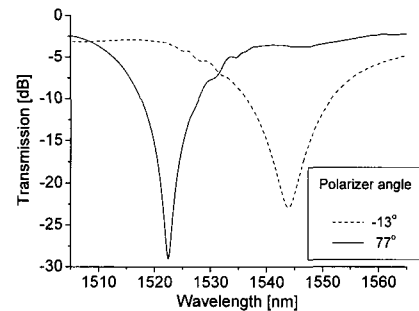
공진 파장들이 달라진다는 것을 의미한다. 따라서 입력 편광에 따라 LPFG의 공진 파장이 달라지는 이러한 결과는 HB-LPFG의 손실 대역 (loss band) 이 입력 편광에 따라 분리되도록 만들고, 특정한 파장에서는 하나의 선형 편광된 모드만이 가장 큰 손실 골 (loss dip) 을 가지며 억제되어 그 투과 세기가 매우 약해지게 된다 [7,8]. 광섬유 전류 센서에서는 앞에서 언급한 바와 같이 Faraday 효과에 의해 입력 광원의 편광축 즉, 편광 타원 (polarization ellipse) 에서의 방위각 (azimuthal angle) 이 인가된 전류에 비례하여 변하게 된다. 따라서, 센서 헤드 (sensor head) 로 사용되는 광섬유 코일을 지나온 선형 편광된 고정된 파장의 빛이 HB-LPFG로 들어가면, 광섬유 코일을 지나올 때 도선에 흐르는 전류량에 비례하여 빛의 편광 방위각이 변하게 되므로, 이 빛은 HB-LPFG를 통과한 후에는 그 투과 세기가 변하게 된다. 이러한 투과 세기의 변화는 광섬유 코일에서 출력된 빛의 편광 방위각이 크게 변할수록 더 커지게 되며, 이는 전류량과 투과 세기 변화량이 비례함을 의미한다. 따라서, HB-LPFG는 특정한 파장에서 빛의 편광축의 회전을 투과 세기의 변화로 변환해줌으로써, 전류 센서 인터로게이션 소자로 사용될 수가 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

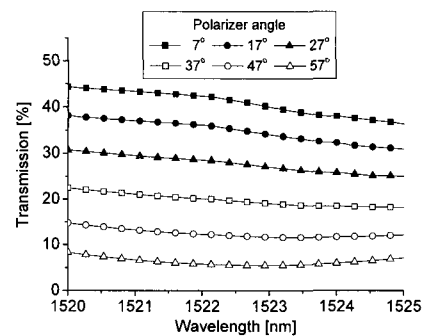
광섬유 편광 분석기로 사용되는 HB-LPFG는 HBF에 LPFG를 새김 (inscribing) 으로써 제작되었다. HB-LPFG의 제작에는 248 nm의 KrF 엑시머 레이저 (excimer laser) 가 사용되었고, HBF에 형성된 격자 주기는 480 μm 이었으며, 그 길이는 30 mm였다. 그리고, HB-LPFG의 제작에 사용된 HBF는 코어 및 클래딩의 구조가 팬더 (panda) 형이었으며, 5일 동안 100 $^{\circ}\text{C}$, ~ 100 기압에서 수소처리 (H_2 loading) 하였다. 또한, HBF의 복굴절은 $\sim 5 \times 10^{-4}$ 정도였다. 그림 1 (a)는 직교하는 입력 편광 (orthogonal input polarization) 에 대해 제작된 HB-LPFG의 투과 스펙트럼을 측정된 것이다. 2장에서 기술한 바대로, 입력 편광에 따라 공진 파장이 달라지며 손실 대역이 나뉘어지는 스펙트럼 모습을 볼 수가 있다. 특히, ~ 1522.5 nm의 파장에서 약 25 dB이상의 편광 소거율 (polarization extinction ratio) 을 가지는 광섬유 편광 분석기의 특성을 보여주고 있다. 그리고, 그림 1 (b)는 관심 있는 영역 (1520~1525 nm) 에서 HB-LPFG 스펙트럼의 선형 투과율을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 1522 nm 근방 파장 대역에서의 투과 세기는 HB-LPFG로 입력되는 빛의 입력 편광 각도들에 대해서 거의 선형적으로 변하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 편광 조절기 (polarization controller; 이하 PC)를 이용하여, 전류 센서 시스템 내의 HB-LPFG에 입력되는 빛의 편광 방위각을 적절히 (예를 들어 27 $^{\circ}$) 맞춰주면, 전류량의 변화에 따른 방위각의 선형적인 회전 변화는 HB-LPFG에서 출력 파워의 선형적인 증가나 감소로 변환될 수 있다.

그림 2는 도선에 흐르는 전류를 측정하기 위한 실험 구성도이다. 레이저 다이오드 (laser diode) 가 단일 파장 광원으로 사용되었으며, 레이저 광원의 파장은 1522 nm, 그 파워는 10 dBm으로 고정하였다. 그리고, 광원의 편광 상태를 조절하기 위해 PC를 사용하였으며, 광섬유 코일은 선형 복굴절이 매우 작은 ($\sim 1 \times 10^{-9}$) 통신용 단일 모드 광섬유를 10 cm 지름의 드럼 (drum) 에 500 회를 감아 구성하였다. 그리고, 도

선으로는 전류를 최대 650 Arms까지 흘릴 수 있는 변압기의 2차 권선을 사용하였다. 그리고, 센서 헤드를 지난 빛은 HB-LPFG로 입력되고, HB-LPFG를 지나는 동안, 도선에 흐르는 전류의 주파수 (60 Hz) 로 변하는 빛의 편광 방위각의 회전각 변화는 광 검출기 (photodetector; 이하 PD) 에서 수신되는 파워의 변화로 전환된다. 그리고, PD에서의 전기적인 신호 출력은 오실로스코프 (oscilloscope) 로 모니터링 하였다. 그리고, 외관이 광섬유 내에서의 편광 상태의 변화에 주는 영향을 최소화하기 위해서, 모든 소자들은 셀로판 테이프로 고정시켰다.



(a)



(b)

그림 1 (a) 직교 편광에서의 HB-LPFG의 투과 스펙트럼, (b) 입력 편광의 방위각에 따른 HB-LPFG의 투과 스펙트럼.

Fig. 1 (a) Transmission spectra of the HB-LPFG at two orthogonal input polarizations, (b) Transmission spectra of the HB-LPFG at input polarizations with various azimuth angles

그림 3은 도선에 흐르는 전류를 600 Arms까지 증가시켜 가며, PD의 출력 신호를 측정된 결과를 보여주고 있다. 측정된 신호는 인가되는 전류와 동일한 정현파였고, ~ 1.5 V의 직류 오프셋 (DC offset) 을 가지고 있었다. 이러한 직류 오프셋은 광섬유를 진행하는 빛의 초기 편광 위치에 따라 변하는 것으로, 소신호 (small signal) 민감도에는 영향을 끼치지 않는다. 그리고, 측정된 결과에서 계산된 최소 검출 가능 전류는 ~ 1.3 mA/Hz $^{1/2}$ 이었다. 그림 4는 그림 3에서 나타나는 PD 출력 신호의 기본파 성분 (60 Hz) 의 진폭만을 추출하여 도선에 흐르는 전류값에 해당하는 기본파 성분의 진폭을 도시한 그림이다. 그림 4의 결과에서 볼 수 있듯이, 제안된 전류 센서를 이용하여, 0~600 Arms까지의 전류를 만족할만한 선형성을 보장하며 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

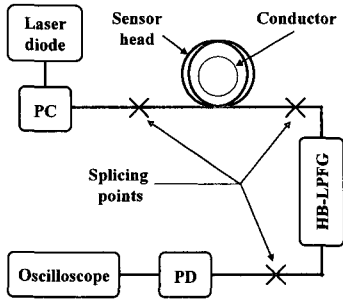


그림 2 실험 구성도
Fig. 2 Experimental setup

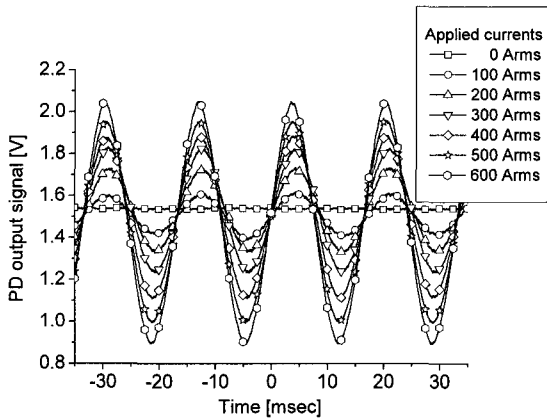


그림 3 도선에 인가된 전류를 광섬유 전류 센서로 측정했을 때, 센서 시스템의 PD 출력 신호
Fig. 3 PD output signal of the proposed sensor system

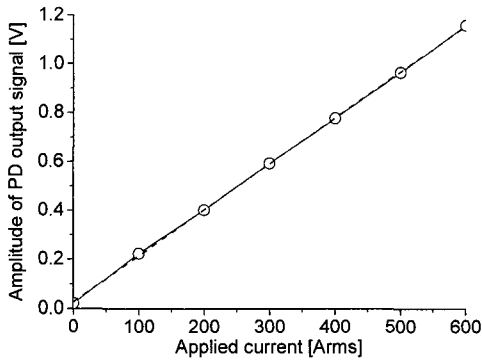


그림 4 제안된 센서 시스템 출력의 선형성
Fig. 4 Measured output linearity of the proposed sensor system

4. 결 론

본 논문에서는 간단한 구조의 광섬유 편광 분석기를 센서 인터로게이션 소자로 사용한 광섬유 전류 센서에 대해서 기술하였다. 광섬유 편광 분석기로서 HBF에 LPFG를 형성한 HB-LPFG를 제작하여 사용하였으며, 제작된 HB-LPFG는 ~1522.5 nm의 파장에서 25 dB이상의 편광 소거율을 나타내었다. 제안된 광섬유 전류 센서를 이용해 600 Arms까지 전류를 측정해 보았으며, 인가된 전류에 대한 센서 시스템의 측정

결과가 만족할만한 선형성을 유지함을 보였다. 장주기 격자는 본질적으로 온도에 매우 민감하기 때문에 실제 전류 센서 시스템으로의 적용에 있어서는 관측실 환경에서 일어날 수 있는 수준의 온도 변화에는 영향을 받지 않도록 패키징(packaging)을 하거나 TEC cooler와 같은 온도 조절기를 사용하는 것이 필수적이다.

감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원의 "High Risk High Return Project" 사업의 일환으로 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] A.M. Smith, "Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fibers," *Applied Optics*, vol. 17, no. 1, pp. 52-56, 1978.
- [2] A.J. Rogers, "Optical measurement of current and voltage on power systems," *IEE Journal on Electric Power Applications*, vol. 2, pp. 120-128, 1979.
- [3] A. Papps and H. Harms, "A magneto-optic current transformer," *Applied Optics*, vol. 19, no. 22, pp. 3729-3745, 1980.
- [4] S.C. Rashleigh and R. Ulrich, "Magneto-optic current sensing with birefringent fibers," *Applied Physics Letters*, vol. 34, no. 11, pp. 768-770, 1979.
- [5] K. Kurosawa, S. Yoshida, and K. Sakamoto, "Polarization properties of the flint glass fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 1378-1384, 1995.
- [6] T. Wang, C. Luo, and S. Zheng, "A fiber-optic current sensor based on a differentiating Sagnac interferometer," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 3, pp. 705-708, 2001.
- [7] A.S. Kurkov, M. Douay, O. Duhem, B. Leleu, J.F. Heninot, J.F. Bayon, and K. Rivoallan, "Long-period fiber grating as a wavelength selective polarization element," *Electronics Letters*, vol. 33, no. 7, pp. 616-617, 1997.
- [8] B. Ortega, L. Dong, W.F. Liu, J.P. de Sandro, L. Reekie, S.I. Tsympina, V.N. Bagratashvili, and R.I. Laming, "High-performance optical fiber polarizers based on long-period gratings in birefringent optical fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 1370-1372, 1997.