

Faraday Rotator Glass 광섬유 센서코일을 이용한 전류센서의 기계적 변형에 대한 안정도 분석

(A Stability Analysis of Fiber-Optic Current Sensor about a Mechanical Deformation
Using by Faraday Rotator Glass Fiber Sensor Coil)

김기혁* · 송민호

(Kee-Hyuck Kim · Minho Song)
진북대학교 전자정보공학부

Abstract

The stabilization of fiber-optic current sensor has been achieved by using a broadband light source and a Faraday Rotator Glass fiber sensor coil. The very low photo-elastic constant of the fiber suppressed output variations within $\pm 0.4[\%]$ when mechanical disturbance was applied to the sensor coil. Noise characteristics, with different light sources, have also been analyzed, which experimentally proved that the wider bandwidth source showed the better noise performance.

1. 서 론

광학을 이용한 전류센서는 광학 매질의 전기적 무유도성, 절연성으로 초고전압, 대전류 계측에 있어서 신뢰성, 안정성, 경제성 등의 많은 장점을 가지고 있다. 반면, 철심 코어에 권선을 감아 유도전류를 측정하는 방식의 기존 전자기 유도식 전류센서(Current Transformer)는 전력 계통의 고전압화에 따라 규모가 큰 절연설비의 요구로 비용이 증가하고 절연을 위해 오일이나 SF₆ 가스 등을 이용하여 비환경 친화적인 단점을 가진다. 또한, 철심 코어의 사용으로 인한 자기 포화나 잔류 자속 등의 현상에 의하여 출력의 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 광 전류센서의 측정 방법으로는 자기장의 세기에 따라 광학매질을 진행하는 광 신호의 편광 축 회전 정도를 분석하는 편광 분석 방법과 Sagnac 간섭계를 이용하여 서로 반대 방향으로 진행하는 두 신호의 위상 차이를 분석하는 간섭계 방법이 있다. 본 논문에서는 광섬유를 센서코일로 이용하여 센서시스템 광학 회로 구성이 용이하고 대전류 측정에 적합한 편광 분석형 방법으로 광섬유 전류센서를 구성하였다.[1][2][3] 하지만, 광섬유 전류센서는 소형화, 경량화, 취급의 편이성 등 여러 장점을 가지고 있음에도 불구하고 그동안 실용화가 되지 못했던 가장 큰 이유는 센서 매질로 사용되는 광섬유의 선형 복굴절현상에 의한 센서 출력의 왜곡 때문이다.[4] 선형 복굴절을 극복하기 위한 방법으로 광섬유를 비틀어서 만든 twisted 광섬유, 센서코일 제작 후 열처리 과정을 하여 만든 annealed 광섬유, 광섬유 제조 시 두 축의 대칭성으로

잔존 복굴절을 최소화한 low-birefringence 광섬유 등이 제시되었다.[5][6] 본 논문에서는 센서 출력을 안정시키기 위하여 광섬유에 납을 첨가해서 광탄성 상수(photo-elastic constant)를 매우 작게 만든 Faraday Rotator Glass 광섬유(flint glass 광섬유, 이하 FRG 광섬유)를 센서코일로 사용하여 선형 복굴절의 영향을 최소화 하고자 하였다. FRG 광섬유와 단일모드 광섬유 센서코일의 끝단에 각각 단순거울과 FRM(Faraday Rotator mirror)을 부착하고 기계적인 변형을 유도하여 선형 복굴절이 센서 출력에 미치는 영향을 분석하였고, FRG 광섬유가 단일모드 광섬유에 비하여 높은 전류 민감도 보여 센서코일으로써 우수한 특성을 가짐을 보였다. 또한, 광원의 코히어런스(coherence) 정도에 따른 센서 출력의 노이즈 특성을 비교하기 위하여 광폭 광원(broadband source, BBS)과 레이저 등을 광원으로 사용하여 출력의 안정화 정도를 비교분석하였다.

2. 본 론

2.1. 측정 방법

Faraday 효과는 자기장의 세기에 따라 광섬유를 지나 는 선형 편광축이 회전하는 것이다. 그림 1과 같이 선형 편광된 빛을 검광기로 분석하여 전류의 세기를 측정하는 것이 편광 분석형 전류측정 방법이다.

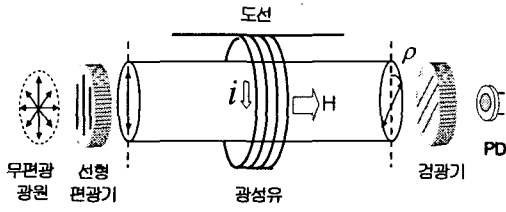


그림 1. 편광 분석법을 이용한 전류 측정.
Fig. 1. Current measurement using polarimetric analysis.

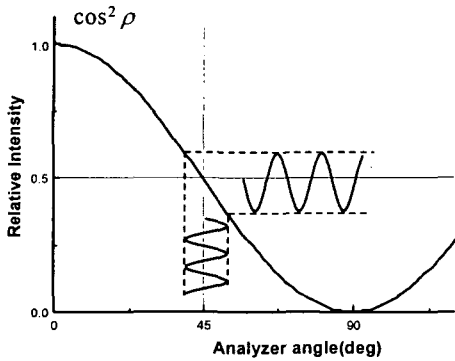


그림 2. 검광기 회전각에 의한 출력의 민감도.
Fig. 2. Sensitivity according to analyzer angle.

선형 편광기(linear polarizer)와 검광기(analyzer)의 각에 따라 PD(photo detector)로 검출되는 출력이 그림 2와 같은 $\cos^2 \rho$ 전달 함수를 갖기 때문에 편광기와 검광기 사이의 각이 45일 때 가장 선형적이며 큰 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

2. 2. 선형 복굴절 영향의 극복

기술한 바와 같이 Faraday 효과로 전류를 측정하는 방법은 이론적으로는 간단하지만 실제로 센서를 구성할 때 여러 가지 원인으로 선형복굴절이 야기되어 센서의 출력을 감소시킨다. 선형복굴절의 주원인으로는 광섬유 제조 시 두 축의 비등방성으로 인한 내부의 선형 복굴절과 센서코일 제작 시 구부림이나 당겨짐 등에 의한 구조적 복굴절, 또한 온도, 진동 등에 의한 외부 환경적인 복굴절 등이 있다. 이러한 선형 복굴절의 영향을 간단히 식으로 정리해보면 다음 식과 같다.

$$I(\theta = 45^\circ) = \frac{E_{x, in}^2}{2} (1 + \sin \phi \sin \chi) \quad (1)$$

$$\sin \phi \sin \chi = 2\rho \frac{\sin \phi}{\phi},$$

$$\phi = \sqrt{\delta^2 + (2\rho)^2} \quad (2)$$

(δ : 선형 복굴절, ρ : Faraday 효과에 의한 원형 복굴절)

선형복굴절 δ 의 값이 0 일 경우 이상적인 출력을 얻을 수 있지만 δ 의 값이 Faraday 효과에 의한 원형 복굴절 ρ 값 보다 클 경우 즉, $\delta \gg 2\rho$ 라면 출력이 그림 3의 sinc 함수 형태로 감소된다. 선형 복굴절 δ 값을 최소화 하는 방법으로는 높은 원형 복굴절을 야기시켜 상대적으로 선형 복굴절의 영향을 감소시키는 twisted 광섬유를 사용하는 방법, 센서코일을 열처리하여 선형복굴절을 제거한 annealed 광섬유, 광섬유 제조 시 두 축이 등방성을 갖게 하여 구조적인 선형 복굴절을 제거하는 방법이 제안되었으며, 본 논문은 광섬유에 납을 첨가하여 광탄성(photo-elastic) 상수가 매우 작고 Verdet 상수가 단일 모드 광섬유에 비하여 약 5배 이상 큰 FRG 광섬유를 사용하였다.[7][8] 사용된 FRG 광섬유(Hoya LBF-1550)의 제원은 표 1과 같다.

표 1. FRG 광섬유의 제원. (@ 1550 nm)
Table 1. The specification of a FRG fiber

광탄성 계수 [$^2/\text{kg}$]	0.45×10^{-13}
Verdet 상수 [urad/A]	3.75 (silica glass의 5배)
내부 복굴절	2.0 [$\%/\text{m}$]
투과 손실	1.5 [dB/m]
Bending loss	≤ 0.1 [dB] (직경 ≤ 100 [mm])

위의 특성을 가진 FRG 광섬유를 이용하여 선형 복굴절 δ 값을 최소화 시키고 Faraday 원형복굴절 ρ 값을 크게 하면 즉, $\delta \ll 2\rho$ 경우 센서 출력의 DC에 성분에 대한 AC성분의 값은 식 (3)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$S = \sin 2\rho \approx 2\rho \quad (3)$$

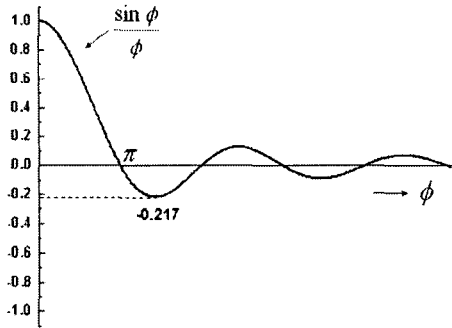


그림 3. 선형 복굴절 영향에 따른 출력의 감소.
Fig. 3. Output reduction according to linear birefringence.

또한, 외부 온도나 진동에 의한 환경적 문제나 구조적인 원인으로 추가되는 선형복굴절은 FRG 광섬유 끝단에 거울을 부착하여 효과적으로 제거할 수 있다.

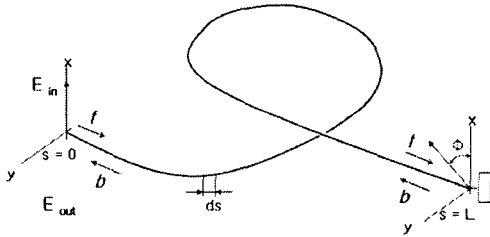


그림 4. 선형 복굴절 제거에 효과적인 반사형 구조.
Fig. 4. The reflection type sensor coil to remove linear birefringence effect.

그림 4와 같이 FRG 광섬유 끝단에 반사경을 부착하여 반사구조로 구성할 경우 비가역적(non-reciprocal) 특성인 선형 복굴절은 식 (4)와 같이 제거되고 가역적(reciprocal) 특성인 Faraday 원형 복굴절은 두 배가 된다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_{\text{for ward}} + \Phi_{\text{backward}} \\ &= \int_0^L \delta(s) ds + \int_L^0 \delta(s) ds = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

2. 3. 실험 및 결과

1 [m] 길이의 FRG 광섬유 센서코일을 도선에 2회 감고 그 끝단에 FRM 반사경을 부착하였으며 광원으로는 광폭 광원인 BBS를 사용하여 편광 분석형 광섬유 전류 센서를 그림 5와 같이 구성하였다. 또한, 전류원은 도선을 약 300 회 감고 AC 슬라이드와 저항기를 이

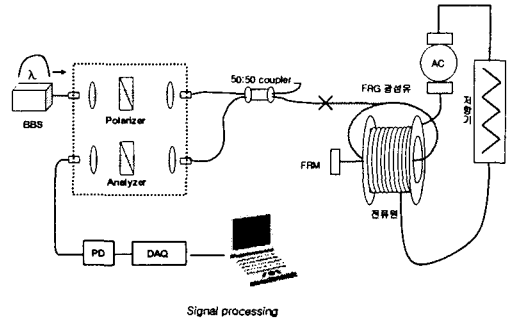


그림 5. 편광분석형 광섬유 전류센서의 개략도.
Fig. 5. Configuration of polarimetric fiber-optic current sensor.

용하여 최대 1500 [AT]의 실효치 전류를 발생하도록 구성하였다. 기계적 변형에 따른 선형복굴절 영향을 비교하기 위하여 단일모드 광섬유와 FRG 광섬유 센서코일 끝단에 각각 단순거울과 FRM(faraday rotator mirror)을 부착하여 센서 출력의 변동율을 비교하였다.

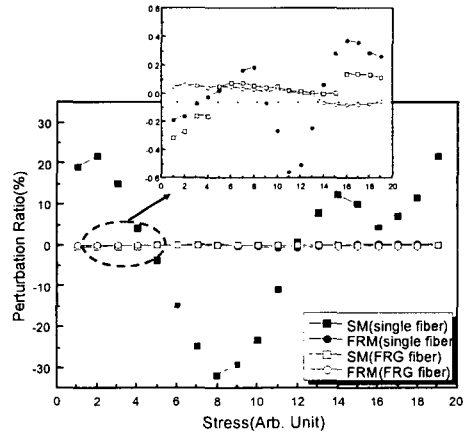


그림 6. 단순거울(SM)과 FRM 반사경을 부착하고 단일모드 광섬유와 FRG 광섬유에 기계적 변형에 따른 출력 변동을 비교.

Fig. 6. The comparison of output variations according to mechanical deformation when single mode fiber and FRG fiber coils are attached to simple mirror and FRM.

그림 6과 같이 FRG 광섬유 센서코일 끝단에 반사경을 부착할 경우 그 반사경의 특성에 관계없이 ± 0.4 [%] 이내의 출력 안정도를 보였고, 단일 모드 광섬유 센서코일 끝단에 FRM을 부착한 경우 ± 0.6 [%] 이내의 비교적 안정된 출력을 보인 반면, 단순거울을 부착한 경우 ± 30 [%]의 출력 불안정성을 보였다. FRG 광섬유 센서코일 내의 잔존 복굴절이 단일모드 광섬유에 비하

여 매우 작고 기계적 변형에 의한 선형 복굴절에 보다 안정함을 알 수 있다. 단일 모드 광섬유 센서코일에서 FRM 반사경이 단순거울보다 선형복굴절 영향을 효과적으로 제거하고 있음을 알 수 있다.[8][9]

또한, FRG 광섬유의 Verdet 상수는 일반 단일모드 광섬유에 비하여 5배 이상 크므로 적은 턴 수도도 동일한 출력을 얻을 수 있다. 일정한 전류를 인가한 후, 각 센서코일의 전류에 대한 민감도를 측정하기 위해 도선에 단일모드 광섬유를 50회 감고 FRG 광섬유를 2회 감아서 출력의 스펙트럼을 비교하였다. 그림 7의 결과 두 출력의 신호가 약 -6 [dB] (1/4) 이상의 차이를 보였는데 표 2와 같이 정리 할 수 있다. 실험 결과는 단일 모드 광섬유의 출력이 FRG 광섬유에 비해 4배 크지만 50회와 2회의 광섬유 페루프 구성을 감안하면 센서코일로 FRG 광섬유를 센서코일로 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다. 표 2와 같이 이론적인 결과와 실험의 결과가 차이가 나는 이유는 일반 단일모드 광섬유를 많은 턴수로 감을 때 발생하는 선형복굴절에 의하여 출력이 감소하였을 것으로 예상 할 수 있다.[7]

표 2. 단일모드 광섬유와 FRG 광섬유를 센서코일로 사용하여 센서 출력의 크기 비교.

Table 2. The comparison of output amplitude using a single mode fiber and a FRG fiber sensor coil.

	Verdet 상수 비	센서코일의 감은 수	예상 결과	실제 결과
SM fiber	1 배	50 회	5 배	4 배
FRG fiber	5 배	2 회	1 배	1 배

광원에 따른 노이즈 특성비교를 위하여 EDF(erbium doped fiber)를 980 [nm] LD로 펌핑하여 구성한 ASE(amplitude spontaneous emission) BBS(a), F-P (Fabry-Perot) 다중모드 LD(b), DFB(distributed feedback) 단일모드 LD(c) 등을 이용한 경우의 센서출력 스펙트럼을 비교하였다. 그림 8과 같이 BBS를 사용한 경우 60 Hz 전류 신호는 약 53 [dB] 이상의 SNR을 가지며 F-P 다중모드 레이저와 DFB 단일모드 레이저를 사용한 경우는 각각 40 [dB], 30 [dB] 정도로 SNR이 저하되어, 코히어런스가 낮고 광파워 밀도가 작은 광폭 광원일수록 간섭노이즈나 후방산란이 적어 전류센서의 안정화에 도움이 됨을 확인할 수 있다.

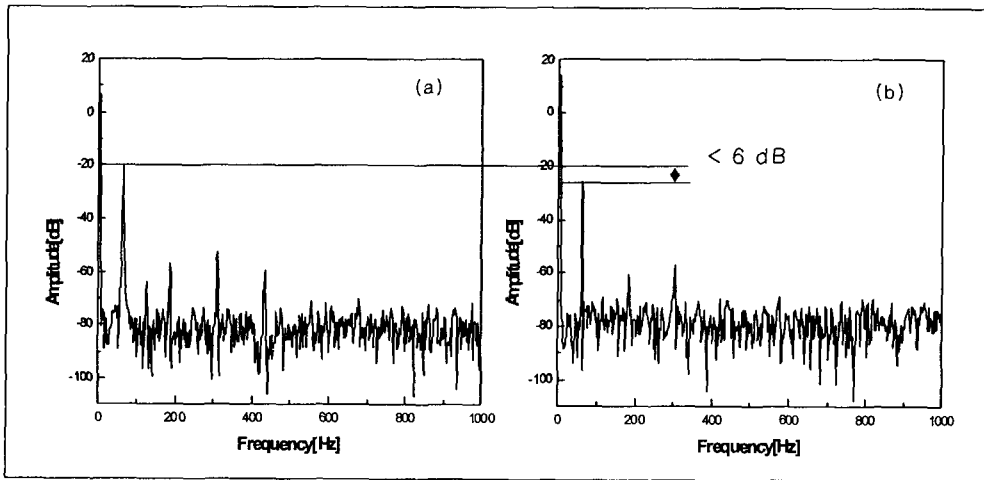


그림 7. 출력 민감도 비교, (a) 단일모드 광섬유 50회, (b) FRG 광섬유 2회.

Fig. 7. The comparison of output sensitivity.

(a) single mode fiber 50 turns. (b) FRG fiber 2 turns.

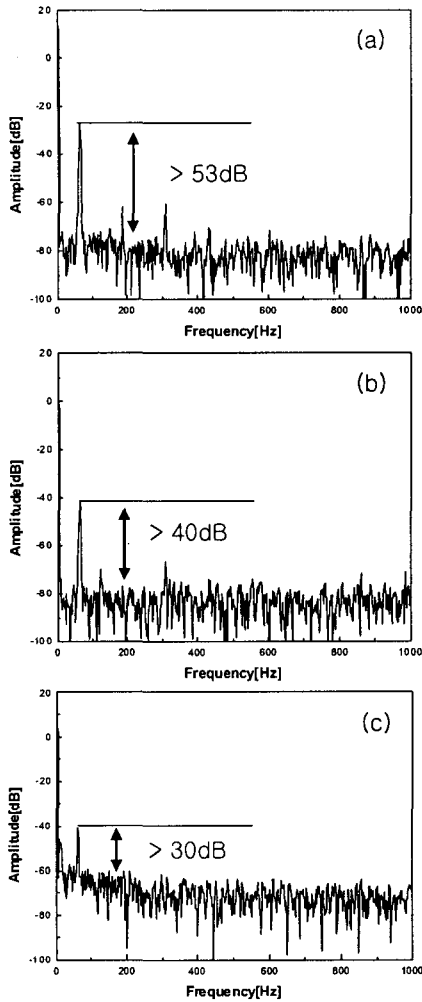


그림 8. 광원에 따른 전류센서의 출력 주파수 스펙트럼, 광원으로 (a) BBS (b) F-P 다중모드 레이저 (c) DFB 단일모드 레이저 사용.

Fig. 8. The frequency spectrum of current sensor outputs with different light sources (a) BBS (b) F-P multi mode laser diode (c) DFB single mode laser diode.

3. 결 론

광섬유 전류센서의 센서코일로 FRG 광섬유를 사용하면 낮은 복굴절유도로 반사 거울에 관계없이 $\pm 0.4\%$ 의 출력 안정도를 보였고 단일모드 광섬유를 센서코일로 사용할 경우 단순 거울보다 FRM을 사용하는 것이 선형 복굴절 제거에 효과적이었다. 또한, FRG 광섬유를 센서코일로 사용하면 높은 Verdet 상수로 인하여 도선

에 2회 감은 출력이 단일 모드 광섬유 센서코일을 10회 이상 감은 효과를 보였으며, ASE 광폭 광원을 사용한 경우 F-P LD와 DFB LD 등의 좁은 파장대역을 가지는 레이저 광원을 사용한 것보다 각각 13 [dB], 23 [dB] 이상 SNR이 개선됨을 확인할 수 있었다. 편광 빔가르개 (Polarization beamsplitter)를 이용하여 두 개의 광신호를 PD로 검출하여 두 신호의 DC 성분에 대한 AC 성분의 비로 연산하여 신호처리 할 경우 보다 나은 전류 센서의 출력을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] A. J. Rogers, "Optical-fibre current measurement," Int. J. Optoelectronics, vol. 3, pp. 391-407, 1988.
- [2] J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, "In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor," IEEE Transaction on power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 116-121, 1996.
- [3] F. Briffod, L. Thevenaz, P.-A. Nicati, A. Kung, p. A. Robert, "Polarimetric current sensor using an in-line Faraday rotator," IEICE Trans. Electron, Vol. E83-C, No. 3, pp. 331-335, 2000.
- [4] G. W. Day, K. B. Rochford, A. H. Rose, "Fundamentals and problems of fiber current sensors," Tech. Digest, 11th OFS Conf., Sapporo, Japan, pp. 124-129, 1996.
- [5] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," Appl. opt, vol. 18, No. 13, pp. 2241-2251, 1979.
- [6] D. Tang, A. H. Rose, G. W. Day, and S. M. Etzel, "Annealing of linear birefringence in single-mode fiber coils: application to optical fiber current sensors," J. Lightwave Technol., vol. 9, no. 8, pp. 1031-1037, 1991.
- [7] K. Kurosawa and I. Masuda, "Faraday effect current sensor using flint glass fiber for the sensing element," Proc. of OFS, 1993.
- [8] K. Kurosawa, S. Yoshida, and K. Sakamoto, "Polarization properties of the flint glass fiber," J. Lightwave Technol., vol. 13, no. 7, pp. 1378-1384, 1995.
- [9] N. C. Pistoni and M. Martinelli, "Vibration insensitive fiber-optic current sensor," Opt. Lett., Vol. 18, No. 4, pp. 314-316, 1993.