

광CT 센서코일 끝단의 반사율이 전류측정에 미치는 영향

(Effects of reflective index of fiber sensor coil end on current measurement)

박형준* · 김현진 · 송민호

(Hyoung-Jun Park* · Hyun-Jin Kim · Minho Song)

Abstract

We improved an efficiency of fiber-optic current transformer by using a metal-coated sensor coil. To reduce the linear birefringence, we used a length of spun fiber as sensor coil, and then used a flint glass fiber coil for comparison. To make the sensor coil in the reflection type, we used different reflection mirrors at the end of the sensor coil, such as a Faraday rotator mirror, a simple mirror, a metal-coated fiber end and a simple fiber end. From the experimental results, the linear error of current measurements were less than ~ 0.2 % regardless of the mirror types. The metal-coated sensor was the most cost-effective considering the fabrication cost and the simple structure.

1. 서론

전자계식 CT(current transformer)는 철심코어를 이용하여 무절연성, 전류유도성의 단점을 가지고 있으며, 자기포화나 잔류자기의 영향에서 자유롭지 못하다. 고전압, 대전류 설비에서는 이러한 단점을 극복할 수 있는 광 CT(current transformer), 즉 광 전류센서는 사용하는 광학소자를 이용하여 보다 안정적인 계측시스템을 구성하는 것이 용이하다.[1] 또한, 광 CT는 광부품의 형태에 따라, 벌크형과 광섬유형으로 구분할 수 있으며, 광섬유형의 경우, 광손실이 적고, 계측 대상체의 형태에 제한을 받지 않으며, 휴대 가능한 시스템으로 개발이 용이하다. 또한 광섬유형 전류센서는 페루프형 센서로 쉽게 구현이 가능하며, 센서 코일의 회전수를 조절하여 전류측정의 범위와 민감도를 자유롭게 조절할 수 있다는 장점을 갖는다.[2][3] 광섬유 내에서 다양한 원인에 의해 발생하는 선형복굴절의 영향을 최소화하기 위해, 열처리한 광섬유 코일[6], 납을 많이 첨가한 flint glass 광섬유 코일[7][8], 그리고 비튼 광섬유로 만든 코일[9] 등을 이용하였다. 또한, 반사형 구조의 센서코일을 제작하여, 센서코일의 이동, 설치를 용이하고, 전류 측정의 효율을 높이고자 노력하였다. 본 논문에서는 반사형 광섬유 센서코일의 제작을 위해 광섬유 끝단에 금속 코팅을 하였으며, 기존의 반사형 광섬유 센서코일에 사용된, 반사경들과 비교 실험하여 광 CT의 센서코일으로써 타당성을 실험하였다.

2. 광섬유 CT의 편광분석

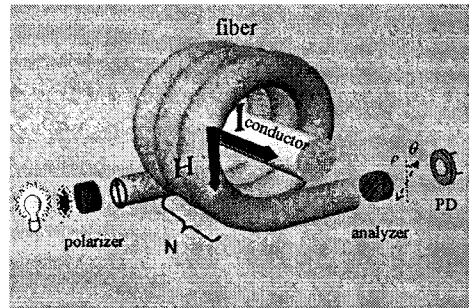


그림 1. 광섬유형 CT의 동작원리
Fig. 1. The mechanism of fiber-optic current transformer.

광섬유 센서코일을 이용하여 전류를 측정하는 원리는 자기장에 의해서 형성되는 광섬유의 원형복굴절 변화, 즉 페러데이(Faraday) 효과를 검출하여 도체에 흐르는 전류의 값을 알아낸다. 자기장의 세기와 방향에 따라 선형편광이 회전하게 되는데, 이 회전정도를 편광기를 사용하여 측정하는 것을 편광분석형 광 CT라 하고 그림 1에 그 개략도를 나타내었다. 그림 1에서 편광기를 거친 선형편광이 광섬유에 입사하면 광섬유를 진행하는 동안 자기장에 의해서 편광의 진동축이 다음 식으로 정의되는 회전각 ρ 만큼 회전한다.

$$\rho = VNI \oint H \cdot d = VNI \quad (1)$$

(V: Verdet 상수, H: 자기장의 세기, N: 센서코일의 감은 수, I: 전류의 세기)

입력측 선형편광과 출력측 검광기의 사이각이 θ 일 때, 센서코일의 출력은 $\cos 2\theta$ 의 비선형 전달특성을 가진다. 따라서 $\theta = \pm 45^\circ$ 에서 선형적이고, 민감도가 큰 출력을 얻을 수 있으므로 사이각을 이에 맞추어 설정한

다. Wollaston 프리즘이나 편광 빔가르개(polarization beamsplitter)를 이용하여 센서코일의 출력 광신호를 편광에 따라 분리한 후, 두 개의 광검출기를 이용하면 $\theta = \pm 45^\circ$ 인 두 경우의 출력 I_1, I_2 를 동시에 얻을 수 있다. 이들 출력에서 직류성분을 제거하고 다음 식과 같이 신호처리하면 페러데이 회전각 ρ 에 비례하는 출력값을 얻을 수 있다.

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin 2\rho \approx 2\rho \quad (2)$$

3. 선형 복굴절의 영향

광섬유 CT에 사용하는 센서코일은 다양한 원인으로 선형복굴절이 발생하며, 센서의 출력을 왜곡시킨다. 광섬유내에서 발생하는 선형복굴절의 원인은 광섬유의 제작 상에서 발생하는 비등방성, 또는, 비대칭으로 인해, 선형복굴절이 야기 되며, 센서코일을 제작, 설치 시에 구부림이나 온도, 진동과 같은 외부 환경적 외란 의해 발생한다. 센서 코일의 선형 복굴절을 최소화하기 위해서, 선형 복굴절의 영향을 감소시킨 twisted 광섬유, 센서코일에 열처리하여 선형복굴절을 제거한 annealed 광섬유, 광섬유 제조 시 두 축이 등방성을 갖게 하여 구조적인 선형 복굴절을 제거한 저복굴절 광섬유를 사용하는 방법이 제안되었다. 본 논문에서는 flint glass 광섬유와 스펀광섬유를 센서코일로 사용하였다[10]. 광섬유 센서코일은 한쪽 끝단에 금속코팅을 하여 개방형 구조로 제작하였다. 열처리 광섬유 센서코일과 달리 기존 회로를 분리하지 않고 설치할 수 있으며, 센서코일을 왕복하므로 회전각이 두 배가 되어 감도를 증가시킬 수 있다[11].

4. 실험 및 결과

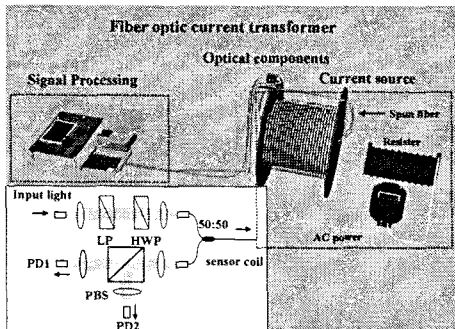


그림 2. 광섬유 전류센서의 개략도.
Fig. 2. Schematic of fiber optic CT. (LP: Linear polarizer, HWP: Half wave plate, PD: Photo diode, FRM: Faraday rotating mirror, PBS: polarization beam splitter)

그림 2은 실험을 위해 제작한 광섬유 전류센서의 개략도이다. 광원으로 ASE(amplitude spontaneous emission) 광폭광원을 사용하였고, 입사된 광원은 무편광 상태에서 선형편광으로 변환하기 위하여 40 dB 이상의 소광비(extinction ratio)를 갖는 선형 편광기를 사용하였으며, 편광기와 반파장 위상지연기(half wave retarder plate)는 일체형 블록에 설치되어 광섬유와 정렬이 용이하게 구성되었다. 반파장 위상지연기는 선형 편광의 진동축이 출력단의 검광기와 45° 혹은, -45° 의 각을 이루도록 조정하는 역할을 한다. 전류원은 도선을 1000회 감고, 교류 슬라이더스와 가변저항을 이용하여, 최대 3000 [AT]의 실효치 전류를 발생하도록 제작하였다. 반사경을 설치한 센서코일에서 반사된 광신호는 광섬유 커플러를 거친 뒤, 검광기의 역할을 하는 광섬유형 편광 빔가르개(polarization beam splitter)를 통과하여, 편광성분에 따라 2개의 광검출기에 의해 검출된다. 검출된 광신호는 DAQ(data acquisition) 보드를 통해 임베디드 컴퓨터로 읽어 들인 후 Labview 프로그래밍을 통해서 신호처리 되었다. 실험은 반사율이 다른 종류의 반사경을 센서코일에 부착하여, 비교실험을 하였다.

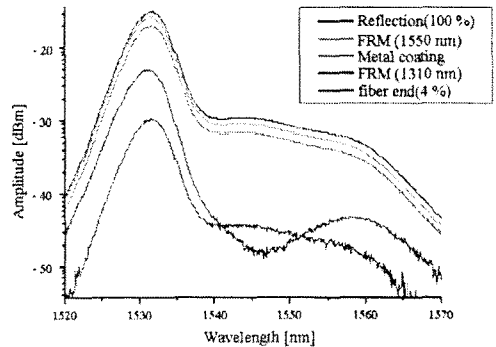


그림 3. 반사경 종류에 따른 반사 특성

Fig. 3. The reflective characteristic according to mirrors type.

그림 3는 다른 종류의 반사경을 광섬유 커플러 한쪽 끝에 장착하고, OFA(optical fiber amplifier) 광원을 입사하여 반사되어 온 광신호를 OSA(optical spectrum analyzer)로 취득한 그림이다. 단순 미러의 경우 반사율이 가장 높았으며, 1550 파장대역의 FRM 미러의 경우 반사율이 84.5 %였고, 실험을 위해 광섬유 끝단에 금속코팅을 한 반사경은 64.1 %였다. 광섬유 절단면의 경우 프레즈넬 반사에 의해 이론적으로 4 %의 빛이 반사되지만, 커넥터 사이에서 빛의 손실로 3.4 %반사가 이루어졌음 확인하였다. 또한, 광섬유 절단면의 각도를 조절하여 금속코팅을 한 후, 반사율을 조사하였다. 광섬유의 절단면을 각각 90° , 70° , 45° 로 제작하였고, 절단면이

70°, 45°인 경우 0.9, 0.4%의 빛만이 반사됨을 확인하였다. 센서코일 끝단에 단순미러가 아닌 FRM을 사용한 경우, 센서코일에 잔존하는 선형복굴절이 배가되어 전류측정 안정화를 저해하는 것으로 보고되었다. 따라서, 광섬유 절단면에 금속코팅을 하여 제작한 반사경과 FRM과 비교하여, 실험하였으며, 그림 4는 flint glass 광섬유와 Spun 광섬유를 센서코일로 이용하고, 4개의 다른 반사경을 장착하여 전류를 500 AT씩 증가하여 3000 AT까지 전류를 출력하여 표시하였다.

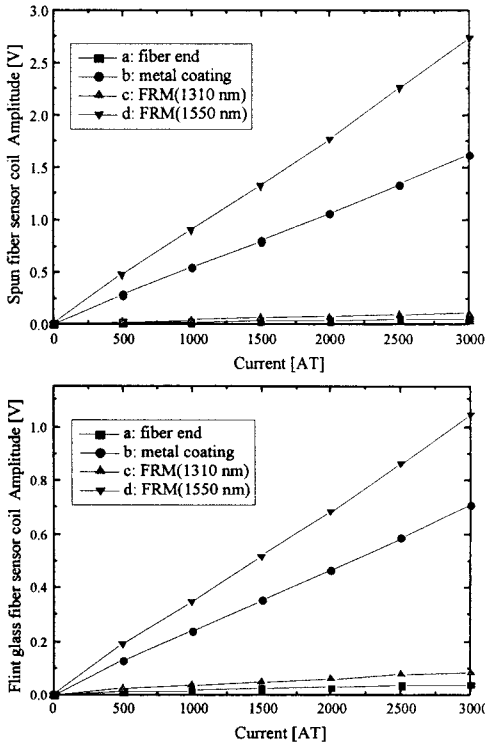


그림 4. 센서코일과 반사경 종류에 따른 광섬유 CT 출력의 변화.

Fig. 4. The output variation of fiber-optic CT according to type of sensor coils and mirrors.

전류 센서코일로 사용된 스펀 광섬유는 10회를 감았고, flint glass 광섬유는 2회를 감아 전류 변화를 측정하였다. 일반적으로 flint glass 광섬유는 일반 광섬유보다 Verdet 상수가 5배 높은 것으로 보고되었지만, 미터 광손실률이 1.7 dB이고, 스펀 광섬유의 출력과 비교하여 같은 조건에서 크게 차이 남을 확인 할 수 있다. 실험에서 1550 nm의 파장대역의 FRM을 장착한 경우 가장 큰 센서 출력을 얻을 수 있었으며, 광섬유 끝단에 금속 코팅을 한 경우에도 전류 변화에 따라, 센서 출력이 효과적으로 반응하고 있음을 확인하였고, 전류증가에 따른 센서 출력의 선형화 오차는 0.2 %였다. 확인하였다. 그림 5는 실효치 3000 AT의 입력 전류를 설정한 후,

센서코일 끝단에 FRM을 장착한 경우와 센서코일 끝단을 금속코팅 한 경우, 절단면을 유지하여, 각각의 센서 코일의 출력을 FFT(fast Fourier transform) 분석하여 비교, 표시한 것이다. FRM을 장착한 경우 60 Hz의 교류전류 주파수 성분이 5.3 dB로 비교 실험한 대상 중 가장 큰 출력을 얻을 수 있었으며, 메탈 코팅의 경우에도 0.8 dB로 비교적 큰 센서 출력을 얻었다. 센서코일을 절단면 처리 한 경우에는 -31.6 dB로 전류변화에 따른 신호취득이 어려울 것으로 예상 되었다. 광섬유 센서 끝단에 금속코팅을 한 경우 60 Hz 전류신호의 주파수 성분은 노이즈 레벨에 비하여 약 70 dB 이상의 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio)를 가지고 있음을 확인하였다.

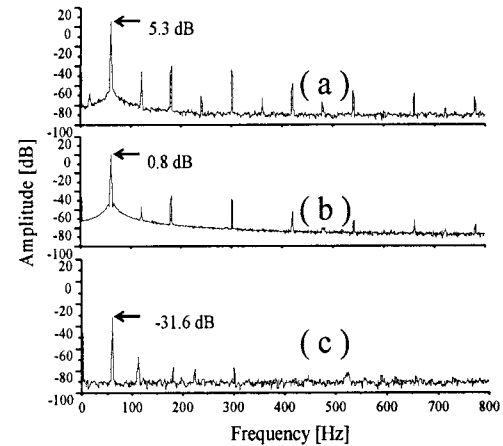


그림 5. 반사경에 센서코일의 출력 민감도

Fig. 5. Sensitivity of sensor coil output according to mirror type (a: FRM(1550 nm), b: metal coating, c: fiber end)

3. 결론

본 논문에서는 광섬유 전류 센서코일의 끝단에 금속코팅을 하여, 반사형 센서코일을 제작하였고, 임베디드 컴퓨터를 이용하여 휴대 가능한 전류센서 시스템을 개발하였다. 광섬유 끝단에 금속코팅 처리하여 제작한 센서 코일의 효율성을 입증하기 위해, FRM(1550 nm), FRM(1310 nm), 단순 반사경, 광섬유 절단면과 비교 실험을 하였다. 금속코팅을 한 경우, 전류변화에 따른 센서출력의 선형화 오차가 0.2%로 확인되었으며, 신호대 잡음비도 70 dB 이상 이었다. 센서 코일 끝단에 금속 코팅을 할 경우, 반사형 구조의 광섬유 전류센서 코일을 제작 할 수 있으며, 반사경을 장착하는 것보다 경제적으로 저렴하게 센서 시스템을 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

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 and 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 and 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 and 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, S. Yoshida, and K. Sakamoto, "Polarization properties of the flint glass fiber," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1378-1384, 1995.
- [8] 김기혁, 송민호, "Faraday Rotator Glass 광섬유 전류센서," *조명.전기 설비학회논문지*, vol. 18, no. 4, pp. 28-33, 2004.
- [9] 김기혁, 송민호, "비틀린 광섬유 센서코일을 이용한 편광분석형 광섬유 전류센서," *조명.전기 설비학회논문지*, vol. 18, no. 2, pp. 135-141, 2004.
- [10] R. I. Laming and D. N. Payne, "Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 12, pp. 2084-2094, 1989.
- [11] 김기혁, 송민호, "Faraday 반사경을 이용한 광섬유형 전류센서의 안정화," *조명.전기 설비학회 논문지*, vol. 17, no. 6, pp. 72-76, 2003.