

# 스핀 광섬유를 이용한 편광 분석형 광섬유 전류센서

(Polarimetric Fiber-optic Current Transformer using a Spun Fiber)

박형준\* · 김현진 · 송민호

(Hyong-Jun Park · Hyun-Jin Kim · Min-Ho Song)

## 요 약

대전류 측정용 편광 분석형 광섬유 CT를 개발하였다. 센서코일은 스펀 광섬유의 끝단에 FRM 반사경을 부착하여 개방형으로 구성하였으며, 전류측정 실험을 통한 출력신호의 선형화 오차는  $\pm 2[\%]$  이내였다. 비틀림 광섬유와 flint glass 광섬유 센서코일을 동일한 조건에서 실험하여 비교 검토한 결과, 스펀 광섬유가 각각 50배, 2배 큰 전류 측정 민감도를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

## Abstract

A polarimetric fiber-optic CT has been developed by using a sensing coil made of a length of spun fiber. A Faraday rotator mirror is attached to the end of the sensor coil to double the sensitivity and to suppress the residual linear birefringence effect. From the current measurements, the linear error no more than  $\pm 2[\%]$  was obtained. The output of spun fiber sensor coil was compared with those of the twisted- and the flint glass fiber's, and it turned out to almost 50 times, 2 times more sensitive, respectively.

Key Words : Fiber-Optic CT, Spun Fiber, Twisted Fiber, Faraday Rotator Glass, Flint Glass Fiber

## 1. 서 론

광 CT(current transformer), 즉 광 전류센서는 사용하는 광학소자의 절연성, 무유도성에 의하여 기존의 전자계식 CT에 비하여 고전압, 대전류 상황에서 보다 안정적인 계측시스템을 구성하기에 용이하다[1]. 또한 철심코어를 사용하지 않으므로 자기포화나 잔류자기의 영향에서 자유롭다는 장점이

있다. 광 CT는 센서로 사용하는 광학매질의 형태에 따라, 벌크형과 광섬유형으로 구분할 수 있으며, 광섬유형의 경우, 페루프형 센서를 쉽게 구현하여 외부 노이즈의 영향을 줄일 수 있으며, 코일의 회전수를 조절하여 전류측정의 범위와 민감도를 자유롭게 조절할 수 있다는 장점을 갖는다[2-3]. 그러나 광섬유의 비대칭 구조, 혹은 코일을 만드는 과정의 구부러짐에 의해서 생성되는 선형복굴절이 광신호의 편광상태를 왜곡시켜서 광 CT의 현장작용을 어렵게 하는 요소로 작용하였다[4-6]. 따라서 국내외의 선행연구는 열처리한 광섬유 코일[6], 납을 많이 첨가한 flint glass 광섬유 코일[7-8], 그리고 비튼

\* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 박사과정

Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394

E-mail : spacegon@chonbuk.ac.kr

접수일자 : 2007년 7월 31일

1차심사 : 2007년 8월 6일

심사완료 : 2007년 8월 21일

## 스핀 광섬유를 이용한 편광 분석형 광섬유 전류센서

광섬유로 만든 코일[9] 등을 이용하여 선형복굴절의 영향을 최소화하는 방향으로 이루어졌다. 각 기법마다 장점이 있는 반면, 열처리 광섬유 코일의 경우에는 열처리 후 코일의 기계적 강도가 떨어지며, flint glass 광섬유는 투과손실(2.5[dB/m])이 너무 커서 5[m] 이상 센서코일로 사용하기 어렵고, 비틀림 광섬유를 제작시에는 광섬유를 균일하게 비틀어 안정적으로 고정하기 어려운 점 등을 단점으로 가진다. Laming 등은 기존의 선형복굴절 억제방법들이 가지는 구조적, 기계적인 약점을 보완하고자 광섬유의 제조과정에서 원형복굴절을 인가한 스펀(spun) 광섬유를 센서코일로 사용할 것을 제안하였다[10]. 일반 광섬유를 비틀거나 열처리한 것과 달리 광섬유의 모재(preform)를 회전하며 사출한 후 피복을 코팅하여 기계적인 강도와 취급의 편의성이 일반 광섬유와 비슷하도록 제조한 것이다. 본 논문에서는 스펀 광섬유를 이용한 광 CT를 구성하여 전류센서로서의 타당성을 실험하였으며, flint glass 광섬유와 비틀림 광섬유를 이용하는 경우의 출력을 비교분석하였다.

## 2. 편광분석형 광섬유 CT

광섬유 센서코일을 이용하여 전류를 측정하는 원리는 다양한 문헌들을 통하여 자세하게 다루어져 왔다[1-10]. 간략하게 정리하자면, 광 CT는 자기장에 의해서 형성되는 광섬유의 원형복굴절 변화, 즉 페러데이(Faraday) 효과를 검출하여 도체에 흐르는 전류의 값을 알아낸다. 원형복굴절의 변화에 따라서 우원형편광과 좌원형편광사이의 위상차가 발생하는데, 이를 광섬유 자이로스코프와 유사한 방법으로 신호처리하는 것이 간접계형 광 CT이다[2]. 두 원형편광성분을 따로 분리하지 않으면 자기장의 세기와 방향에 따라 선형편광이 회전하게 되는데, 이 회전 정도를 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  $\rho$  만큼 회전한다.

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

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

위 식에서 암페어의 법칙(Ampere's law)이 사용되었는데, 즉 크기와 모양에 관계없이 자기장을 폐회로에 대하여 선적분하면 폐회로를 통과하는 전류가 되는 것이다. 이는 광섬유가 아닌 벌크형 광학소자를 센서로 이용하는 경우에는 얻기 힘든 특징이다. 즉 폐회로를 구성하기 어려우므로 센서와 도체의 거리나 방향 등에 따라서 측정결과가 달라질 수 있으며 측정대상이 아닌 다른 신호에 의해서도 영향을

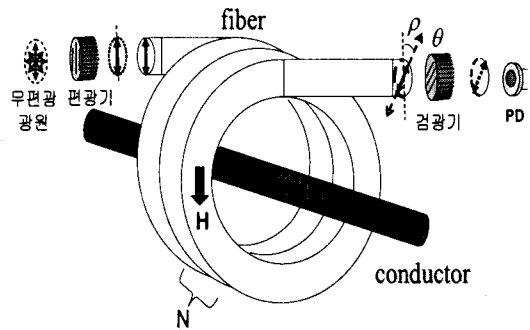


그림 1. 광섬유형 CT의 동작원리  
Fig. 1. The mechanism of fiber-optical current transformer

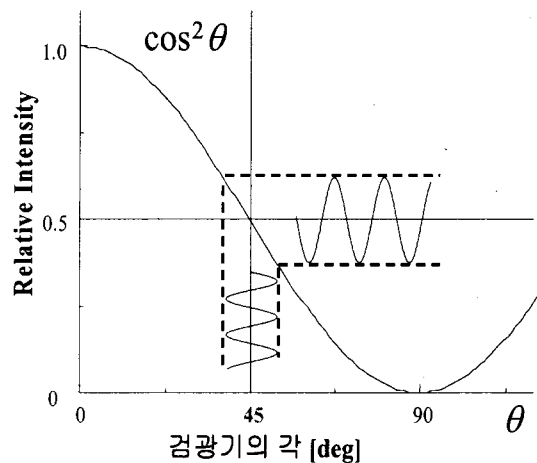


그림 2. 광 CT의 투과 특성  
Fig. 2. The transmission characteristic of optical CT

받을 수 있기 때문이다. 입력측 선형편광기와 출력측 검광기의 사이각이  $\theta$ 일 때, 센서코일의 출력은 아래 그림 2와 같이  $\cos^2\theta$ 의 비선형 전달특성을 가진다. 따라서  $\theta = \pm 45^\circ$ 에서 선형적이고, 민감도가 큰 출력을 얻을 수 있으므로 사이각을 이에 맞추어 설정한다.

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  $\rho$ 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. 스펀 광섬유

서론에서 기술한 바와 같이 스펀 광섬유는, 광섬유 사출 과정 중 광섬유 모재를 회전시켜서 선형복굴절의 영향을 억제할 만큼 높은 수치의 원형 복굴절을 형성시킨 광섬유이다[10]. 본 논문에서 사용된 스펀 광섬유(IVG, LB1500)는 [m]당 333 회전의 비틀림을 가하여 제작되었고, 주요 제원은 표 1과 같다.

표 1. IVG-LB1500 스펀 광섬유의 제원 (@1550[nm])

Table 1. The specification of a spun fiber

Cut-off wavelength (nm)	< 1450
Attenuation (dB/km)	4.5
Spin period (mm)	3
Insertion Loss (dB)	< 3.0
Bending radius (mm)	> 15

스펀 광섬유를 이용한 센서코일은 한쪽 끝단에 FRM(Faraday rotating mirror) 반사경을 장착하여 개방형 구조로 제작하였다. 열처리 광섬유 센서코일과 달리 기존 회로를 분리하지 않고 설치할 수 있으며, 전류신호에 의한 페러데이 회전각은 광 신호의 진행방향과는 무관한 비가역적 특성이므로 센서코일을 왕복할 경우 회전각이 두 배가 되어 감도를 증가시킬 수 있기 때문이다. 또한 FRM 반사경은 광신호의 편광축을  $90^\circ$  회전하게 하므로 센서코일을 왕복한 뒤, 두 편광모드간의 상대 위상차는 센서코일에 입사할 때의 값과 동일하게 되어 출력단에서 선형편광을 유지하도록 한다[11].

### 4. 실험 및 결과

그림 3은 제작한 스펀 광섬유 전류센서의 개략도이다. 광원은 1520~1570[nm]의 중심파장, 50[nm]의 대역폭을 가지는 ASE(amplitude spontaneous emission) 광폭광원을 사용하였다.

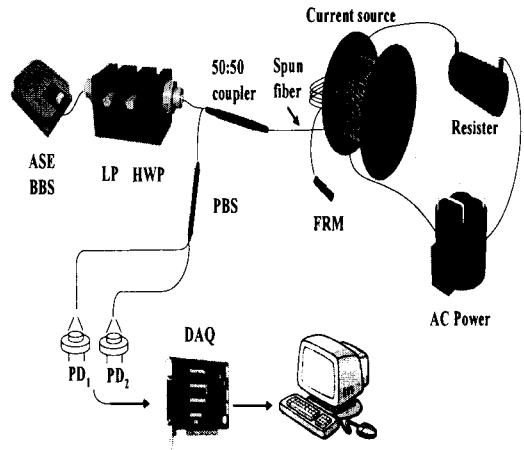


그림 3. Spun 광섬유 전류센서의 개략도  
Fig. 3. Schematic of spun fiber optical CT(LP: Linear Polarizer, HWP: Half Wave Plate, PD: Photo Diode, FRM: Faraday Rotating Mirror, PBS: Polarization Beam Splitter)

무편광 상태인 광원을 선형편광으로 변환하기 위하여 40[dB] 이상의 소광비(extinction ratio)를 갖는 선형 편광기를 사용하였으며, 편광기와 반파장

## 스편 광섬유를 이용한 편광 분석용 광섬유 전류센서

위상지연기(half wave retarder plate)를 정렬이 용이하도록 설계된 일체형 블록에 설치한 후 시준기(collimator)를 이용하여 광섬유와 정렬하였다. 반파장 위상지연기는 선형 편광의 진동축이 출력단의 검광기와 45[°] 혹은, -45[°]의 각을 이루도록 조정하는 역할을 한다. 전류원은 도선을 1,665회 감고, 교류 슬라이다스와 가변저항을 이용하여, 최대 6,500[AT]의 실효치 전류를 발생하도록 제작하였다. FRM 반사경을 부착한 길이 10[m]의 스펀 광섬유를 도선 주위로 10회 감아서 센서코일을 구성하였다. 센서코일에서 반사된 광신호는 광섬유 커플러를 거친 뒤, 검광기의 역할을 하는 편광 빔가르개(polarization beam splitter)를 통과하여, 편광성분에 따라 2개의 광검출기에 의해 검출된다. 검출된 광신호는 DAQ(data acquisition)보드를 통해 컴퓨터로 읽어 들인 후 LabVIEW 프로그래밍을 통해서 신호 처리되었다.

그림 4 (a)는 500~2,500[AT]까지 전류를 500[AT]씩 증가하면서 광 CT의 출력파형을 기록한 것이며, 그림 4 (b)는 0~6,500[AT]의 범위에서 교류파형의 크기를 계산하여 표시한 것으로 측정값을 curve fitting한 결과와 비교하여 선형화 오차는 ±2[%] 이내였다. 선형복굴절의 영향을 억제하기 위한 이전의 방법들과 계속성능을 비교분석하기 위하여 스펀 광섬유 이외에 flint glass 광섬유, 비틀림 광섬유를 이용하여 동일한 조건의 전류측정 실험을 행하고 그 결과를 비교하여 그림 5에 나타내었다. 이론적으로는 식 (1)에 의해서 입력전류  $I$ 가 동일한 경우 출력의 크기는 광섬유의 Verdet 상수  $V$ 와 코일의 감은 수  $N$ 에 비례하게 된다. 스펀 광섬유와 비틀림 광섬유의 경우 Verdet 상수가 동일하며, flint glass 광섬유는 1550[nm] 파장대역에서 일반 광섬유의 5배에 해당하는 크기의 Verdet 상수를 가진다[8].

따라서 3가지의 센서코일이 동일한 민감도를 가질 수 있도록 flint glass 광섬유는 2회 감고 나머지 광섬유는 10회 감아 코일을 구성하였다. 사용된 비틀림 광섬유는 일반 광섬유를 미터당 20회 비틀 후 끝단을 고정하여 만들었다. 이론적인 민감도를 동일하게 조정하였으나 각 센서의 출력은 그림 5에서 보이

는 바와 같이 매우 큰 차이를 보였다. 스펀 광섬유 센서의 출력이 가장 크게 나타났으며, flint glass 광섬유 센서는 스펀 광섬유의 53[%], 비틀림 광섬유 센서는 2[%]에 해당하는 작은 출력을 보였다. 이는 flint glass 광섬유를 사용하거나 일반 광섬유를 비틀어 만든 센서코일의 선형복굴절 억제효과가 스펀 광섬유에 비하여 크게 떨어지고 있음을 보이는 결과이다. 선형복굴절의 억제효과 이외에도 flint glass 광섬유와 일반 광섬유간의 접속손실이 출력 민감도에 영향, 그리고 비틀림 광섬유의 기계적인 비틀림에 의한 광손실의 영향이 또한 출력의 손실에 미치는 영향이 클 것으로 판단된다.

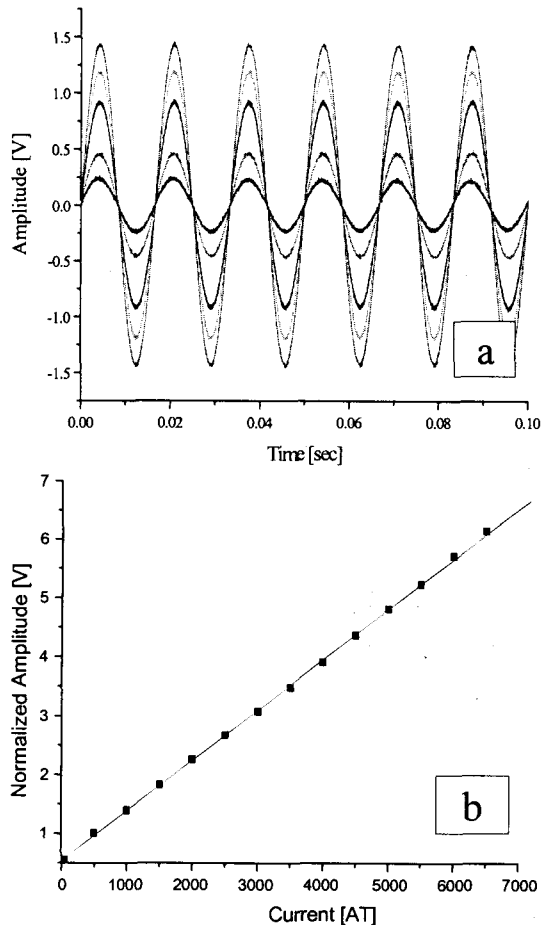


그림 4. 광섬유 CT 출력의 변화  
Fig. 4. The output variation of fiber-optic CT

그림 6은 실효치 6,500[AT]의 입력 전류를 설정한 후, 각 센서코일의 출력을 FFT(fast Fourier transform) 분석하여 비교, 표시한 것이다. 스펀 광섬유를 사용한 경우, flint glass 광섬유에 비하여 6[dB], 비틀림 광섬유에 비하여 35[dB] 이상 큰 센서출력을 얻어서 그림 5와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 동일한 실험에서 스펀 광섬유의 경우, 60[Hz] 전류신호의 주파수 성분은 노이즈 레벨에 비하여 약 55[dB] 이상의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 가지고 있음을 확인하였다.

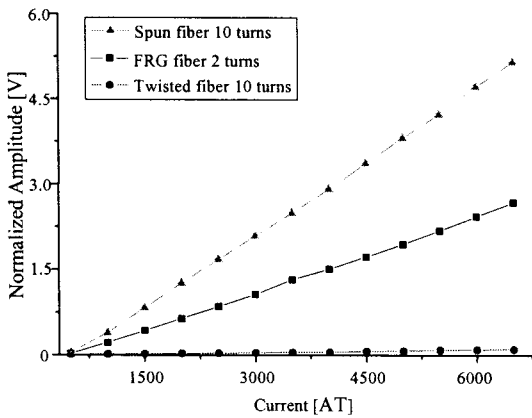


그림 5. 다양한 센서코일에 따른 출력의 변화  
Fig. 5. The output variation with different sensor coils

## 5. 결 론

스핀 광섬유 센서코일을 사용하는 광섬유형 전류 센서 시스템을 개발하고, 실험을 통하여 전류증가에 따른 출력신호의 선형화 오차가  $\pm 2[\%]$  이내임을 측정할 수 있었다. 선행 연구에서 사용했던 비틀림 광섬유나 flint glass 광섬유로 제작한 센서코일로 측정할 경우에 비하여, 동일한 실험 조건에서 센서 출력의 민감도가 각각 50배, 2배 정도 향상됨을 확인할 수 있었다. 이는 스펀 광섬유가 선형복굴절을 효율적으로 억제하고 있으며, 물리적, 기계적 안정도가 뛰어난 것에 근거한다고 할 수 있다. 스펀 광섬유를 이용한 광 CT의 개발과 응용이 대전류 측정의 효율성을 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [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," IJCE 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,

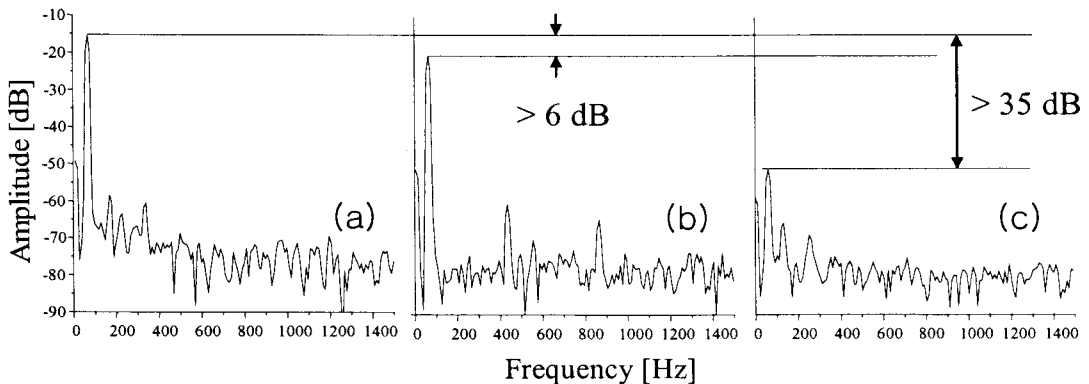


그림 6. 센서코일에 따른 출력 민감도 비교  
(a) 스펀 광섬유 N=10, (b) flint glass 광섬유 N=2, (c) 비틀림 광섬유 N=10  
Fig. 6. The comparison of output sensitivity according to difference sensor coils  
(a) spun fiber N=10, (b) FRG fiber N=2, (c) twisted fiber N=10

## 스핀 광섬유를 이용한 편광 분석형 광섬유 전류센서

- 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, "1629 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 설비학회논문지*, vol. 17, no. 6, pp. 72-76, 2003.

## ◇ 저자소개 ◇

### 박영준 (朴亨浚)

1976년 6월 2일생. 2002년 전북대 졸업. 2004년 농 대학교 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 전북대학교 전자정보공학부 박사과정.

### 김현진 (朴亨浚)

1980년 11월 8일생. 2007년 전북대 전자정보공학부 졸업. 현재 전북대학교 전자정보공학부 석사과정.

### 송민호 (宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 농 대학 졸업(석사). 1997년 서울대학교 전기공학부 졸업(박사). 1997~2000년까지 Pennsylvania 주립대학의 Post-Doc tor. 2000년 9월 이후 전북대학교 전자정보공학부 부교수로 재직.