

# Faraday 반사경을 이용한 광섬유형 전류센서의 안정화

(Stabilization of Fiber-optic Current Sensor Using a Faraday Rotator Mirror)

김기혁\* · 송민호

(Kee - Hyuck Kim · MinHo Song)

## 요 약

편광분석법을 이용한 광섬유형 전류센서를 구성하여 다양한 전류측정 실험을 행하였다. 잔존 선형복굴절의 영향을 최소화하기 위하여 광섬유 센서 코일의 한쪽 끝에 Faraday 미러를 장착하였으며 일반적인 미러를 사용하는 경우와 출력의 안정성을 비교분석 하였다. 센서코일에 변형을 가하는 경우나 장시간에 걸친 안정성 실험에서도 Faraday 미러를 사용하는 경우에 출력의 안정성이 현저하게 증가함을 알 수 있었다.

## Abstract

We developed a polarimetric fiber-optic current sensor using a length of twisted fiber and a Faraday rotator mirror which was used to suppress the linear birefringence effect. A gold coated mirror was also used as the sensor coil reflector, and the results were compared with the case of FRM. From the experimental results, it is clear that the FRM greatly enhances the stability of the fiber optic current sensor output.

Key Words : Polarization, Faraday rotator mirror(FRM), Linear birefringence

## 1. 서 론

Faraday 효과는 그림 1과 같이 자성체 광소자를 진행하는 선형편광의 진동축이 자기장에 의하여 회전하는 현상이다. 진동축의 회전각은 자기장의 세기에 비례하므로 이를 정밀하게 측정하는 경우 전류센서로의 적용이 가능하다. 광학적 전류센서의 기본개념이 제안된 것은 매우 오래 전의 일이고 레이저광원과 광소자들을 접목한 실용적인 광전류센서의

형태는 1960년대 후반에 발표되어[1][2] 현재에 이르고 있다. 오랜 연구기간에 비하여 광전류센서는 최근에야 그 상용화된 예를 찾을 수 있는데[3] 그간 제반 광학기술이 취약하였고 기존 권선형 전류센서(CT, current transformer)와 비교하여 고비용이라는 점 등이 실용화를 제한하였기 때문이다.

그러나 광전류센서는 기존 CT의 기술적 제한요소인 자속포화나 잔류자속 등의 문제가 없고 최근 광산업의 발전에 힘입어 품질과 가격경쟁력이 뛰어난 광소자, 부품 등을 확보할 수 있게 됨에 따라 고전압, 대전류 전력계통에의 적용을 중심으로 하는 실용화 연구가 과거 어느 때보다 활발히 이루어지고 있다. 광전류센서는 Faraday 소자의 형태에 따라 광섬유형과 벌크형으로 구분하며 벌크형은 상대적으로

\* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 석사과정  
Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394  
E-mail : kkh0775@hanmail.net  
접수일자 : 2003년 4월 28일  
1차심사 : 2003년 5월 9일  
심사완료 : 2003년 7월 30일

로 구조가 간단하고 안정적이며 경제적인 장점을 가진다. 광섬유형은 선형복굴절에 의하여 환경적인 외란에 크게 영향을 받는 단점이 있으나 벌크형에 비하여 월등히 높은 정밀도와 취급의 자유도를 얻을 수 있기 때문에 큰 관심을 받고 있다.

본 논문에서는 광섬유 센서코일의 한쪽 끝에 Faraday 미러(FRM, Faraday rotator mirror)를 부착하여 선형복굴절 영향을 최소화함으로써 광섬유형 전류센서 출력의 안정을 얻고자 하였으며 그 이론적 배경과 단순 미러를 사용한 경우와 비교 분석한 실험결과 등을 기술하고자 한다.

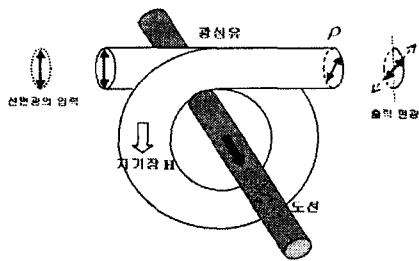


그림 1. Faraday 효과.  
Fig. 1. Faraday effect.

## 2. 편광분석형 광섬유 전류센서

그림 1은 광섬유를 Faraday 소자로 사용한 광전류센서의 동작원리를 보인다. 벌크형 Faraday 소자를 사용하는 전류센서의 연구도 활발히 이루어졌으나 연결 손실이 크고 광 폐회로의 구성이 어려워 도선과 센서간의 거리나 방향 등에 따라 출력이 변하는 단점이 있다. 이에 비하여 광섬유는 도선 주위에 코일형태로 감을 경우 다음 식과 같이 전류, 코일의 회전수 N, 그리고 광섬유의 Verdet 상수의 곱에 비례하는 회전각을 안정적으로 얻을 수 있다.

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

Verdet 상수  $V[\text{rad}/\text{A}]$ 는 광학매질이 자기장에 반응하여 Faraday 효과를 일으키는 정도를 나타내는 값으로 실리카 글래스( $\text{SiO}_2$ )가 주재료인 광섬유는

사용광원의 파장이 클수록 Verdet 상수가 작아지며, 아래 식과 같이 근사되어 진다.[4]

$$V = V_0 (\lambda_0 / \lambda)^2 \quad (2)$$

( $V_0$ : 461  $\mu\text{rad}/\text{A}$ , Verdet constant of  $\text{SiO}_2$   
at  $\lambda_0=633 \text{ nm}$ ,  $\lambda$ = 사용파장.)

1310[nm] 광원을 사용할 경우 광섬유의 Verdet 상수는  $\sim 1[\mu\text{rad}/\text{A}]$  정도이다. 도선의 전류 값을 얻기 위해서 Faraday 회전각을 측정하는 방법은 Sagnac 간섭계를 사용하는 간섭계법[5]과 편광기를 이용하는 편광분석법이 있는데 매우 높은 정밀도를 요구하는 경우에는 간섭계형이, 사용의 편이성과 경제성을 고려할 때는 편광분석형이 적합하다. 본 논문에서는 계통보호용 전류센서를 구성하고자 하였으므로 그림 2와 같은 편광분석형 광전류센서를 구성하였다.

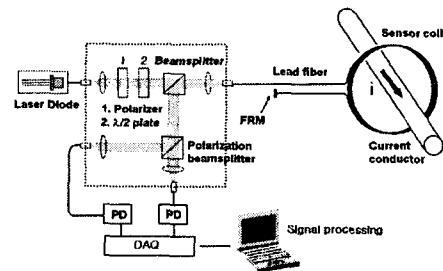


그림 2. 광섬유형 전류센서의 개략도.  
Fig. 2. Configuration of fiber-optic current sensor.

광원은 잔존복굴절 특성이 가장 우수한 1310/1550[nm] 단일모드 광섬유를 센서코일로 이용하기 위하여 1[mW] 정격출력을 갖는 1310[nm] 중심파장의 다중모드 Fabry-Perot 레이저 다이오드(LD, laser diode)를 사용하였다. 편광분석형 광 전류센서의 동작원리는 전류에 의한 선형편광의 Faraday 회전각을 검광기를 이용하여 분석하는 것이므로 입력 편광의 선형성을 보장하기 위하여 광원의 후면에 40 [dB]의 소광비(extinction ratio)를 갖는 편광기(polarizer)를 두었다. 편광기를 통과한 선형편광이 센서코일을 거쳐서 검광기로 사용되는 편광빔가르개

Faraday 반사경을 이용한 광섬유형 전류센서의 안정화

(PBS, polarization beamsplitter)에 다다르면 광신호와 PBS 사이의 상대적인 편광축 각도 차이에 의해서 그림 3과 같은 전달함수 특성을 보이게 된다. 따라서 감도가 크고 선형적인 출력을 얻기 위해서는 센서코일의 출력광과 PBS 사이의 편광각이  $\pm 45^\circ$ 를 이루어야 하며 이를 위하여 편광기의 후면에 반파장판(half wave plate)을 두어 상대적인 편광각을 조절하였다.

편광기와 검광기가  $\theta$ 의 각을 이루는 경우의 출력광은 식 (3)과 같은 Jones Matrix 형태로 표현되어지며

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_{out} = R(\theta)F(\rho) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_{in} \quad (3)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad F(\rho) = \begin{bmatrix} \cos\rho & \sin\rho \\ -\sin\rho & \cos\rho \end{bmatrix}$$

$\theta = \pm 45^\circ$ 인 경우 수광기(PD, photodetector)의 출력은 아래 식과 같다.

$$I_{\theta = \pm 45^\circ} = |E_{x,out}|^2 + |E_{y,out}|^2 = \frac{E_{x,in}^2}{2} (1 \mp \sin 2\rho) \quad (4)$$

한편 식 (4)의 출력은 측정전류와는 무관하게 입력광이나 시스템의 손실 변화에 의해서도 변화할 수 있다. 검광기로 사용된 PBS의 양방향 출력은 두개의 검광기를  $\theta = \pm 45^\circ$ 로 설정한 것과 동일한 경우이므로 양방향 출력을 구하고 다음과 같은 연산을 하면 광량의 변화에 무관하게 Faraday 회전각에 의해서만 변화하는 출력을 얻을 수 있다.

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin 2\rho \approx 2\rho \quad (5)$$

그림 4는 60 Hz, 200 AT의 전류신호에 대한 광섬유 전류센서의 출력 파형이다.  $180^\circ$ 의 위상 차를 갖는 하단의 두 파형은 식 (4)와 같은 PD 출력의 교류치이며 상단의 파형은 두 신호를 아날로그 회로를 이용하여 식 (5)와 같이 연산한 결과이다. 실험에 사용된 광섬유 센서코일은 25[m] 길이의 광섬유를 미터당 20회 비틀어 제작한 것으로 전류원에 40회 감았으며 코일의 최소지름은 12[cm]이다.

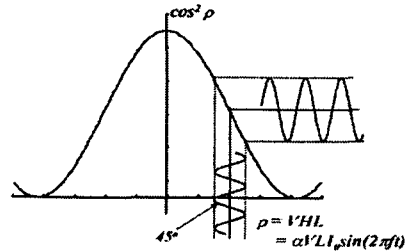


그림 3. 광전류센서의 전달함수.  
Fig. 3. Transfer function of fiber-optic current sensor.

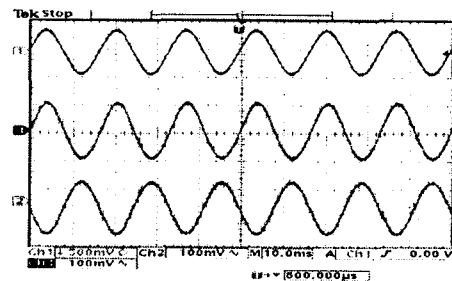


그림 4. 광섬유 전류센서의 출력 파형(@200AT).  
Fig. 4. Output waveform of fiber-optic current sensor (@200AT)

### 3. FRM(Faraday Rotator Mirror) 이용한 출력의 안정화

앞 절에서 기술한 광섬유형 전류센서의 동작은 이상적인 경우를 가정한 것이며 실제로는 광섬유의 제조 과정이나 센서코일을 만드는 과정에서 광섬유내에 발생하는 선형복굴절(linear birefringence)이 센서 출력에 나쁜 영향을 미치게 되고 이것이 광섬유형 전류센서의 실용화를 더디게 한 주요 원인이다. 즉 동작원리상 광섬유를 진행하는 편광은 선형편광이어야 하지만 선형복굴절에 의해서 타원, 또는 원형의 편광상태가 되어 전류에 대한 감도가 심각하게 저하되는 현상이 발생한다. 광섬유를 비틀어 원형복굴절을 인가하거나[6] 센서코일을 고온에서 열처리하는 기법[7] 등을 통한 선형복굴절 영향의 최소화 방안들이 제안된 바가 있는데 본 논문에서는 미터

당 20회 정도 비튼 광섬유를 사용하여 센서코일을 제작하였다. 비틀림에 의한 원형복굴절은 온도 등의 환경적 영향에 민감한 특성을 가져 불안정한 출력의 원인이 되므로 센서코일의 끝단에 그림 2와 같이 반사경을 부착하여 광신호가 같은 경로를 되돌아가게 하였다. 원형복굴절은 광신호의 진행방향에 따라 부호가 바뀌는 가역적(reciprocal) 반응이므로 같은 경로를 왕복하는 경우 그 효과가 상쇄되기 때문이며 한편 Faraday 효과는 비가역적(nonreciprocal) 반응이므로 편광축의 회전각은 배가된다. 따라서 비틀린 광섬유 센서코일의 끝단에 반사경을 부착하는 경우 선형편광을 유지하고 원형복굴절에 의한 출력변화를 제거하며, Faraday 회전각도 배가시키는 등의 장점을 갖게 된다. 하지만 연결광섬유나 비틀린 광섬유의 일부에 잔존하는 선형복굴절은 이러한 반사형 구조에 의해서 그 크기가 배가 되는 특징이 있어서 여전히 출력의 안정화를 저해하는 요소로 작용한다.

이를 해결하기 위한 방법으로 센서코일 끝단에 일반적인 반사경이 아닌 FRM(Faraday rotator mirror)을 사용하면 잔존 선형복굴절의 영향은 상쇄되어진다. FRM은 큰 Verdet 상수를 갖는 Faraday 소자와 자석, 반사경 등으로 구성된 소자로 입사편광의 진동축을 90° 회전시켜 반사시키는 소자이다. 따라서 센서코일을 진행하며 편광의 두 축 성분 사이에 축적된 위상 차는 FRM에서 반사된 후 동일경로를 진행하면서 소멸되어진다.

이 과정을 Jones Matrix로 표현하면 단순 미러의 경우는

$$\begin{bmatrix} e^{i\delta} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e^{i2\delta} & 0 \\ 0 & e^{-i2\delta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 같아서 코일을 왕복한 후 선형복굴절에 의한 위상지연이 배가되며, FRM을 사용하는 경우는

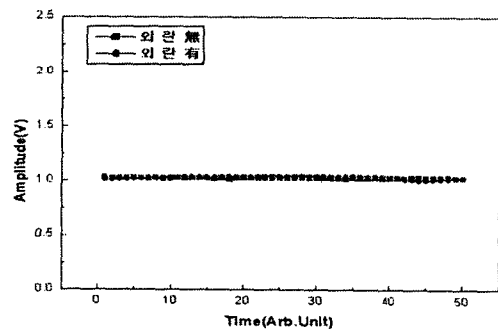
$$\begin{bmatrix} e^{i\delta} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

와 같이 위상지연이 상쇄된다. 이 효과를 실험적으로 증명하기 위해서 동일한 광섬유센서 코일에 FRM과 단순 미러(gold-coated fiber connector end)

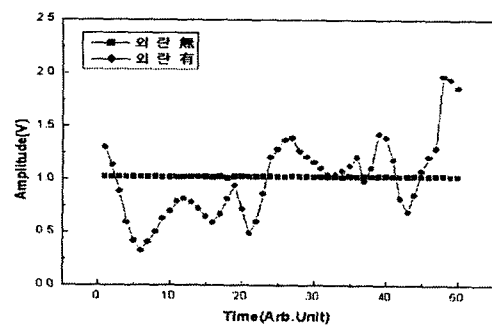
를 부착한 두 가지 경우의 실험을 하고 그 결과를 비교하였다.

그림 5는 센서코일을 안정된 상태로 유지한 경우와 코일에 임의적인 변형을 가한 경우의 출력을 비교한 것이다. FRM의 경우(a)는 코일에 변형이 가해져도 출력의 변화가 거의 없으며 단순 미러를 이용한 경우(b)는 외적인 변형에 따라 출력이 매우 불안정해진다. 이는 잔존 선형복굴절 위상지연( $\phi$ )에 따라 시스템 출력이 식 (8)과 같이 sinc함수의 형태로 변화하기 때문이다. 따라서 출력의 안정화를 얻기 위해서는 선형복굴절에 의한 위상지연( $\rho$ )의 크기뿐만 아니라 그 변화 또한 최소화되어야 한다.

$$S = 2\rho \frac{\sin \phi}{\phi} \quad (8)$$

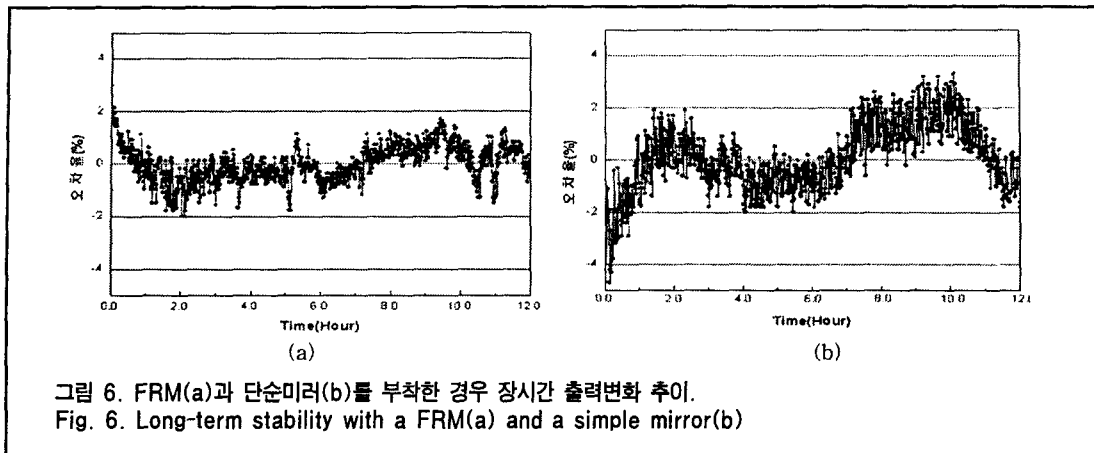


(a)



(b)

그림 5. FRM을 부착한 경우(a)와 단순미러인 경우(b)의 환경적인 외란에 의한 출력의 변화.  
Fig. 5. Output according to environmental noise with a FRM(a) and a simple mirror(b)



장시간에 걸친 동작 안정성을 비교하기 위하여 역시 두 가지 미러를 부착한 센서코일을 기준 전류원에 적용하고 12 시간에 걸친 출력의 변화추이를 그림 6에 나타내었다. 실험실에 공급되는 전류의 변동량과 전류센서의 출력변화를 구분하기 위하여 전류원에 1% 정밀도를 갖는 Hall CT를 장착하고 그 출력을 기준신호로 삼았다.

그림 6은 기준 Hall CT와 광섬유 전류센서의 출력차이를 광 전류센서의 출력으로 나누어 백분율로 표시한 것이다. 그림 6(a)는 FRM을 그림 6(b)는 단순 미러를 센서코일에 장착한 경우의 결과이다. FRM을 장착한 경우 12시간 동안의 출력변화는  $\pm 2\%$  범위로서 단순미러의 경우에 비하여 1/2정도의 변화 폭이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 짧은 시간에 걸친 변화 또한 FRM의 경우가 크게 안정되어 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

편광분석형 전류센서를 구축하고 그 출력을 안정화시키는 방안으로 한쪽 끝에 FRM을 부착한 광섬유 센서코일을 사용하였다. 편광의 회전이 없는 일반적인 반사경을 사용한 경우와 비교 분석한 결과, FRM을 이용하는 경우 환경적인 외란에 대한 안정성과 장시간에 걸친 출력 안정도가 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 환경적인 요인을 차단하는 적절한 패키징과 함께 적용할 경우 크게 안정된 출력을 얻을 수 있을 것으로 생각되며 보다 정량적인 해석

을 위한 연구가 지속적으로 이루어질 것이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

#### References

- (1) Current sensor using Faraday element in flux concentrator and optical fiber to transmit light. U.S. Patent 3,324,393 (1967).
- (2) Proposal of a current sensor using the Faraday effect in optical fiber. U.S. Patent 3,605,013 (1971).
- (3) For example, Nxtphase Corp., www.nxtphase.com.
- (4) A.H. Rose, S.M. Etzel, and C.M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," J. Lightwave Technol., vol. 15, no. 5, pp.803-807, 1997.
- (5) J. Blake, P. Tantaswadi, and R.T. de Carvalho, "In-line Sagnac interferometer current sensor," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp.116-121, 1996.
- (6) R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," Appl. Opt., vol. 18, no.13, pp. 2241-2251, 1979.
- (7) 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.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 김기혁 (金基赫)

1980년 2월 7일생. 2003년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 현재 전북대학교 전자정보공학부 석사과정.

##### 송민호 (宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년, 1992년 서울대학교 전기공학에서 공학사, 공학석사를 취득하였으며 1997년 서울대학교 전기공학부에서 공학박사학위를 취득. 1997-2000년까지 Pennsylvania 주립대학의 Post-Doctor로 일하였으며 2000년 9월 이후 전북대학교 전자정보공학부 조교수로 재직.