

저 복굴절 광섬유를 이용한 대전류 측정에 관한 연구

장남영, 은재정, 최평석, 박해수*, 오상기*
 창원대 전자공학과, 한국전기연구소*

A Study on the High Current Measurement Using Low Birefringent Fiber

Nam Young Jang, Jae Jung Eun, Pyung Suk Choi, Hae Soo Park*, Sang Gi Oh*
 Department of Electronic Engineering, Changwon National University, KERI*

Abstract - In this paper, a fiber optic current sensor(FOCS) is implemented by low birefringence fiber, and the characteristics of FOCS is investigated.

Using the Faraday rotation, the electric current is measured. The measured error is calculated within 1.5% ranging from 1000 to 7500A.

1. 서 론

자기광학 효과중의 하나로 비가역적 현상인 Faraday 효과를 이용한 광섬유 전류센서(FOCS)는 대전류 측정에 있어서 기존의 CT(Current Transformer)에 비해 각광받고 있다. FOCS는 CT에 비하여 전자기 간섭에 대한 영향이 없고, 보다 높은 동적 범위 및 폭넓은 대역폭 그리고 절연 문제의 해소로 인한 부피 및 무게 감소 그리고 저가로 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 위험하고 혹독한 환경에 아주 적합하다[1]. 하지만, FOCS의 단점은 광섬유 자체에 내재된 복굴절로 인한 민감도 감소와 외부의 역학적 진동에 아주 민감하며, 따라서, Faraday 회전으로 인한 비가역적 위상 천이나 선편광 회전을 정확히 측정하는 것이 어렵다.

일반적으로 광 전류센서(OCS)는 Bulk 형과 광섬유를 이용한 FOCS로 나눌 수 있고, 또한 FOCS의 경우에는 비가역적 위상 천이를 측정하는 간섭계형과 선편광의 회전각을 측정하는 편광형으로 나눌 수 있다. Bulk형의 경우에는 큰 Verdet 상수를 갖는 크리스탈을 이용하여 OCS를 구현함으로써 높은 민감도를 나타내지만, 광학계의 정렬이나 온도 드리프트를 겪기 쉬운 반면, FOCS의 경우에는 낮은 Verdet 상수를 갖는 광섬유를 사용하기 때문에, 대전류 측정에 유리하고 또한 광섬유를 도선 주위에 여러 번 감음으로서 민감도를 향상시킬 수 있다[3].

본 논문에서는 선복굴절을 아주 적게한 저 복굴절 광섬유를 이용하여 대전류를 측정할 수 있는 편광형 FOCS를 제작하여, 그 특성을 연구하였다. 먼저, FOCS의 전류 측정원리에 대하여 설명하고, 그 후 실험 구성 및 실험 결과에 대하여 논의한다.

2. 광섬유 전류센서의 측정원리(2)

일반적으로 Faraday 회전은 전류에 의해 발생한 자기장과 빛의 선편광 사이의 상호작용에 의해 선편광이 자기장의 크기에 비례하여 회전하는 현상으로, 즉, 외부 자기장 \vec{H} 가 투명 매질을 투과하는 입사 선편광의 방향에 평행한 편드성분으로 존재한다면, 출력 선편광의 회전각은 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_F = V \int_l \vec{H} dl \quad (1)$$

여기서, l 은 빛의 진행 경로이고 V 는 광섬유의 Verdet 상수를 나타낸다. 따라서, $\phi_F = VNI$ 로 나타낼 수 있으며, N 은 광섬유의 권선수이고 I 는 전류를 나타낸다.

또한, 그림 1에 나타난 편광형 FOCS의 경우에는 선복굴절과 동시에 Faraday 효과에 의해 야기된 원복굴절이 존재하게 되며, 이는 광섬유에 두 가지의 복굴절이 중첩된 것으로 생각할 수 있다. 따라서, Jones 행렬을 이용하여 복굴절의 중첩을 나타내면, 다음으로 표현할 수 있다[4].

$$\begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$A = \cos(\phi/2) + j\cos\chi\sin(\phi/2) \quad (3)$$

$$B = \sin\chi\sin(\phi/2) \quad (4)$$

$$\phi^2 = \delta^2 + (2\phi_F)^2 \quad (5)$$

$$\tan\chi = \frac{2\phi_F}{\delta} \quad (6)$$

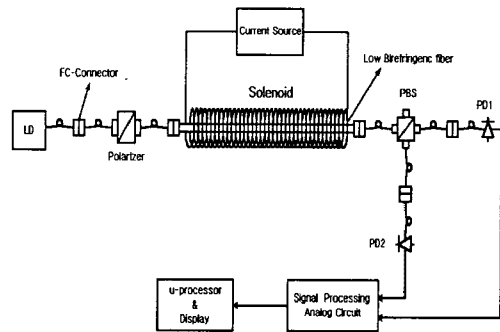


그림 1. 편광형 FOCS의 개략도

$x-y$ 좌표상에 광섬유의 x 축에 대한 θ 의 각도로 입사하는 광을 고려하고, 광섬유 출력을 x 축에 대하여 광검출기를 θ_1 의 위치에서 측정했을 때, 출력 광은 Jones 행렬 계산에 의해 다음으로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{xo} \\ E_{yo} \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos^2\theta_1 & \cos\theta_1\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1\sin\theta_1 & \cos^2\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

이때, $\theta_1 = \pm 45^\circ$ 이고 x 편광이 입사된다면, 광검출기의 출력은 각각 다음으로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = \frac{I_0}{2} (1 + \sin \chi \sin \phi) \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{I_0}{2} (1 - \sin \chi \sin \phi) \quad (9)$$

따라서, 편광도(Degree of Polarization) T 을 다음으로 표현할 수 있다.

$$T = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{2\Phi_F}{\phi} \sin \phi \quad (10)$$

여기서, 선복굴절 $\delta \ll 1$ 인 경우, (5)식에 의해 $\phi \approx 2\Phi_F$ 로 나타낼 수 있으며, $\Phi_F \ll 1$ 인 경우, T 는 다음을 근사화된다.

$$T \approx 2\Phi_F \quad (11)$$

따라서, T 는 전류에 직접 비례하는 양으로 표현되며, 아날로그 회로를 통해 T 를 구함으로써 전류 I 를 측정할 수 있다.

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험 구성

그림 2는 편광형 FOCS의 전체 실험 구성도이다. 광원은 파장 $\lambda = 632.8nm$, 출력 $1mW$ 의 레이저 다이오드(LD)를 사용하였으며, 센싱 광섬유는 Oxford Electronics사의 LB-600 저 복굴절 광섬유를 솔레노이드 중앙에 일직선으로 위치시켜 사용하였다. 또한 전류원으로는 직경이 3ϕ 인 에나멜 구리선을 이용하여, 권선수가 1500번인 솔레노이드를 제작하여 AC 가변 전압원과 트랜스를 조합하여 사용하였다.

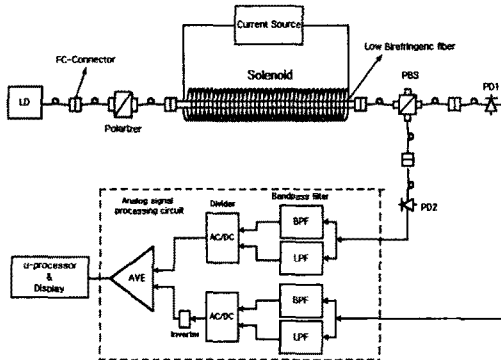


그림 2. 편광형 FOCS의 전체 실험 구성도

그림 2에서 보는 바와 같이, LD에서 나온 광이 편광기를 통과한 후, 일정한 크기로 선편광된 빛을 센싱 광섬유의 입력으로 입사시키고, Faraday 효과로 인한 Faraday 회전을 측정하기 위해, 센싱 광섬유의 출력단에서 나온 출력 광을 PBS를 통해 두 개의 직교 성분으로 나누어 각각 PD1과 PD2의 광 검출기를 이용해 광신호를 검출한다. 각각의 광 검출기에 의해 검출된 광신호들은 그림 3과 4에 나타난 아날로그 신호처리 회로를 통해 편광도 T 를 계산하게 되고, 계산된 T 값은 마이크로 프로세서를 이용하여 Φ_F 에 비례하는 전류 I

을 디스플레이 한다. 여기서, 전류는 AC 가변 전압원을 조절하여 트랜스의 1차측에 공급하고, 그 출력은 솔레노이드가 과열되지 않을 정도로 조절하여 사용하였으며, 60Hz 상용 전원을 사용하여, 전류가 약 0에서부터 7500A 정도까지 가변 되도록 하였다.

그림 3과 4는 아날로그 신호처리 회로의 블록도와 실제 제작된 회로를 나타낸 것으로, PD1과 PD2의 출력 신호는 대역통과 필터를 통과한 AC 신호와 저대역 통과 필터를 통과한 DC 신호를 각각 divider에 공급하여 AC 신호를 DC 신호로 나누게 된다. 이는 DC에 해당되는 광 파워를 AC로 나눔으로서 광원의 크기 변동에 대한 출력의 변화를 억제하고 일정한 출력을 유지하기 위해서이다.

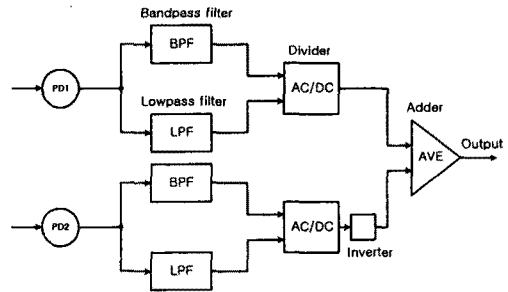


그림 3. 아날로그 신호처리 회로 블록도

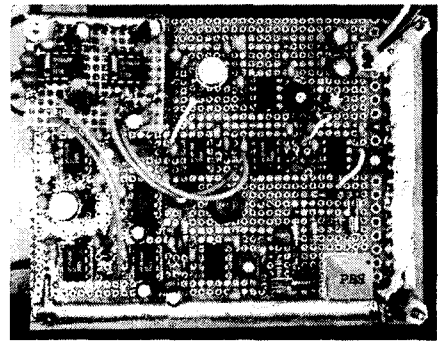


그림 4. 제작된 아날로그 신호처리 회로

3.2 실험 결과 및 고찰

그림 5는 6000A의 전류에 대한 PD1과 PD2의 초단에서의 광 출력을 측정된 것이다. 사용한 전류원의 전류가 대 전류일수록 안정된 출력 신호를 얻을 수 있었으며, 이는 출력 신호의 크기가 잡음의 원인이 될 수 있는 전류 잡음보다 큰 신호로 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 또한 그림 6의 결과는 계산기를 거친 아날로그 신호처리 회로의 출력을 측정된 것이다. 하지만, 전류원의 전류가 저 전류로 갈수록 신호 대 잡음비가 상대적으로 낮아져 높은 오차율을 보였으며, 그 출력 신호를 그림 7에 나타내었다.

그림 8은 기준 전류에 대한 측정 전류의 선형성을 나타낸 것으로, 기준 전류가 대략 700에서 6500A까지의 범위에서는 양호한 선형성을 보였으며, 측정오차는 1% 미만으로 관찰되었다. 하지만, 저 전류에서의 측정오차는 약 3%로 보다 높게 측정되었으며, 1000A - 7500A 범위 내에서 FOCS의 오차율은 약 1.5%로 측정되었다.

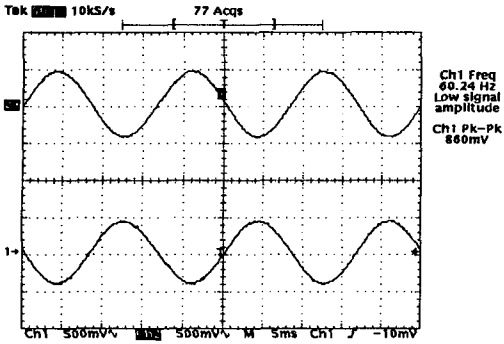


그림 5. 6000A 인가시 PD1, PD2의 출력신호

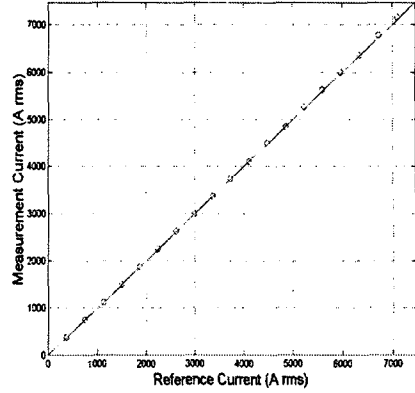


그림 8. 기준 전류 대 측정 전류의 선형성

4. 결 론

본 논문에서는 저 복잡질 광섬유를 이용한 편광형 FOCS를 제작하여 그 특성을 실험하였다. 기준 전류를 0A-7500A 까지 변화시켜 가면서 측정된 전류의 선형성을 고찰하였으며, 약 1000A-7500A 범위에서 측정 오차가 1.5%정도였다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. Papp and H. Harms, "Magneto-optical current transformer. 1: Principles", Applied Optics, Vol. 19, No. 22, pp. 3729-3734, 15 November 1980.
- [2] A. M. Smith, "Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber", Applied Optics, Vol. 17, No. 1, pp. 52-56, 1 January 1978.
- [3] Fabien Briffod, Luc Thevenaz, Pierre-Alain Nicati, Alain Kung, and Philippe A. Robert, "Polarimetric Current Sensor Using an In-Line Faraday Rotator", IEICE TRANS. ELECTRON., Vol. E83-C, No. 3, pp. 331-335, March 2000.
- [4] W. J. Tabor and F. S. Chen, "Electromagnetic Propagation through Materials Possessing Both Faraday Rotation and Birefringence : Experiments with Ytterbium Orthoferrite", Journal of Applied Physics, Vol. 40, No. 7, pp. 2760-2765, June 1969.

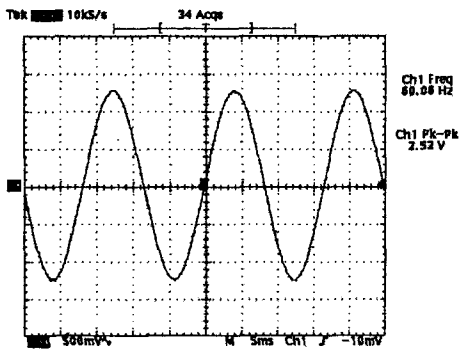


그림 6. 6000A 인가시 아날로그 신호처리 출력신호

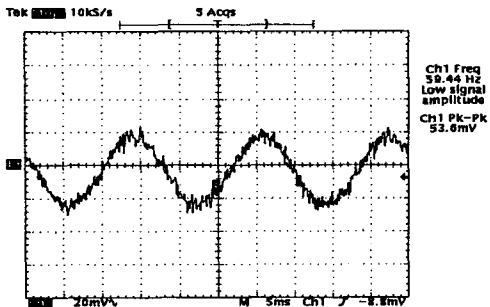


그림 7. 100A 인가시 아날로그 신호처리 출력신호