

논문 2004-41SD-6-5

편광측정법에 의한 광섬유 전류 센서 제작에 관한 연구

(A Study on the Fabrication of Polarimetric Fiber Optic Current Sensor)

장 남 영*, 최 평 석*, 은 재 정*, 박 해 수**

(Nam Young Jang, Pyung Suk Chio, Jae Jeong Eun, and Hae Soo Park)

요 약

본 논문에서는, 편광측정법에 의한 광섬유 전류 센서(P-FOCS)를 실험·제작하여, 실제 필드에 적용할 수 있는 P-FOCS의 상용화 가능성에 대하여 연구하였다. P-FOCS는 인가된 전류에 의해 발생한 자기장에 비례하는 Faraday 회전각을 측정함으로써 인가된 전류를 측정한다. P-FOCS의 센싱 광섬유로는 저복굴절 광섬유를 사용하여 밴딩에 의한 선복굴절의 영향을 최소화하였으며, 벌크(bulk)한 광학소자의 사용으로 인한 광 손실을 막기 위해 전 광섬유 소자를 사용하였다. 또한, 구성된 신호처리회로는 광섬유 소자들의 연결부에서의 손실로 인한 출력 신호의 강도 변화를 제거하기 위해 사용된다. Faraday 회전각은, 632.8nm 파장의 광원을 이용하여 권선수가 약 1500인 솔레노이드에 전류를 인가해 7500A의 전류원의 효과를 얻도록 하여, 솔레노이드 내부에 센싱 광섬유를 통과시켜 측정하였다. 1000A~7500A 범위에서, 선형성의 측정 오차는 약 1.5% 이내였다.

Abstract

In this paper, a polarimetric fiber optic current sensor(P-FOCS) is experimented and fabricated, and then a possibility to the commercial utilization of the P-FOCS is also investigated. The P-FOCS measures an applied current by a Faraday rotation linearly proportional to a magnetic field generated by the applied current. The bending-induced linear birefringence in the sensing fiber is minimized by using the low birefringent fiber. Also, all fiber-optic components are used to avoid optical losses coming from the use of bulk components. A signal processing circuit is constructed and used to eliminate the effects of intensity variations in the output signal due to losses coming from misalignments of components such as fiber connectors. Using the optical source of 632.8nm wavelength, Faraday rotation is measured by passing through the sensing fiber within the solenoid of about 1500 turns which is equivalent to a current source of about 7500A. In the range of 1000A to 7500A, the measurement error for linearity is within about 1.5%.

Keywords : P-FOCS, Faraday rotation angle, Degree of polarization, Low-birefringence fiber

I. 서 론

대전류 측정시, 전자기식 CT(Current Transducer)의 단점인 포화 특성 및 철공진 현상으로 인한 전력공급의 불안정성을 극복하기 위해, 전 영역에서 선형적인 출력

특성을 나타내는 광 CT가 각광 받고 있다. 일반적으로 광 CT는 벌크(Bulk)형과 광섬유를 이용한 광섬유 전류 센서(Fiber Optic Current Sensor : FOCS)로 나눌 수 있고, 또한 FOCS의 경우에는 비가역 위상 천이를 측정하는 간섭계형과 선편광의 회전각을 측정하는 편광형으로 나눌 수 있다.^{[1]-[4]} 벌크형의 경우에는 자기광학 상수인 Verdet 상수가 큰 크리стал을 이용하여 광 CT를 구현함으로써 높은 민감도를 나타내지만, 광학계의 오정렬이나 온도 드리프트를 겪기 쉬운 반면, FOCS의 경우에는 낮은 Verdet 상수를 갖는 광섬유를 이용하기 때문에, 대전류 측정에 유리하고 또한 광섬유를 도선 주위

* 정회원, 창원대학교 전자공학과
(Changwon National University, Dept. of Electronic Engineering)

** 정회원, 한국전기연구원
(Korea Electrotechnology Research Institute)
접수일:2004년1월7일, 수정완료일: 2004년5월7일

에 여러 번 감음으로서 민감도를 향상시킬 수 있다. 이와 같은 광 CT는 자기광학 효과중의 하나로 비가역적 현상인 Faraday 효과를 이용하는 것으로, 전자기식 CT에 비하여 전자기 간섭에 대한 영향이 없고, 보다 높은 동적 범위 및 폭넓은 대역폭 그리고 절연 문제의 해소로 인한 부피 및 무게 감소, 절연에 따른 SF6 gas나 oil 등이 필요 없으므로 환경 친화적인 장점을 가지고 있다.^{[5],[6]} 하지만, 대전류 측정에 유리한 FOCS의 경우, 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.^[7]

현재, 대전류 측정을 위한 광 CT는 전 세계적으로 ABB, Alstom, Siemens, NxtPhase사 등에 의해 상용화되어 제작·판매되고 있다. 특히, NxtPhase사는 In-line Sagnac 간섭계를 이용한 FOCS를 제작해, $1A_{rms}$ 에서 $63kA_{rms}$, 범위의 광 CT를 시판 중에 있다.^[8] 하지만, 국내의 연구는 Sagnac 간섭계를 이용한 전류센서 및 편광형 전류센서에 대한 기초연구는 다수 보고 되고 있으나, 상품화 단계에는 미흡한 실정이다.^{[9],[10]}

따라서 전자기식 CT를 대신할 수 있는 광 CT에 대한 상용화를 위해, 본 논문에서는 편광측정법을 이용한 광섬유 전류센서(P-FOCS)의 Prototype을 제작하여, 그 성능을 평가함과 동시에 실제 필드에 적용할 수 있는 가능성에 대하여 논의한다.

본 논문의 제II장에서는 광섬유의 복굴절 파라메타에 대하여 설명하고, 제III장에서는 편광측정법에 의한 광섬유 전류 센서의 측정원리 그리고 제IV장에서는 출력 신호의 안정화를 위한 신호처리회로에 대하여 설명한다. 제V장에서는 제작된 광섬유 전류 센서의 실험 및 성능을 평가하고, 실제 제작된 P-FOCS의 Prototype에 대하여 설명한다. 그리고 제VI장에서 결론을 맺는다.

II. 광섬유의 복굴절 파라메타

비등방성 매질을 진행하는 수직한 두 편광이 서로 다른 속사이의 굴절률 차이로 인해 위상차가 발생하는 것을 복굴절(birefringence)이라 한다. 이와 같은 복굴절에는 두 개의 수직한 선편광에 의해 발생하는 선복굴절과 두 개의 수직한 원편광에 의해 발생하는 원복굴절로 나눌 수 있다.

표 1. 단일모드 광섬유와 저복굴절 광섬유의 내부 복굴절

Table 1. Intrinsic linear birefringence of low-birefringence and single-mode fiber.

Fiber Type	Core Diameter (μm)	Wavelength (μm)	Calculated Intrinsic linear birefringence ($^{\circ}/m$)	Measured Intrinsic linear birefringence ($^{\circ}/m$)
A	4.7	0.79	500	3297 ± 105
B	5.0	0.79	140	594 ± 48
C	8.6	1.32	40	35 ± 4
LB-600	-	0.633	-	5.73

복굴절은 광섬유의 기하학적 변화 및 매질 특성의 변화 즉, 광섬유 밴딩이나 압착 그리고 비틀림 및 Faraday 효과 등으로 발생한다.^{[11],[12]} 일반적으로, 선복굴절은 광섬유 제작시 완전한 등방체로 구성할 수 없기 때문에 발생하는 내부 복굴절과 밴딩 및 스트레인 등에 의해 발생하는 외부 복굴절로 나뉜다. 이와 같은 선복굴절은 FOCS 제작시, 출력 감도에 영향을 주기 때문에, 본 논문에서는 선복굴절을 최소화한 저복굴절 광섬유(low-birefringence fiber)를 사용한다.^{[10],[14]} 일반적으로 단일모드 광섬유의 경우, 코어의 타원율이 대략 1% 정도로 이는 약 (수십~수백) $^{\circ}/m$ 의 내부 선복굴절을 유발하는 반면, 저복굴절 광섬유의 경우에는 약 (수) $^{\circ}/m$ 의 내부 선복굴절을 발생시킨다. 표 1은 통신용 단일모드 광섬유들과 저복굴절 광섬유의 내부 선복굴절을 비교한 것으로 저복굴절 광섬유의 사용으로, 내부 선복굴절의 영향을 최소화할 수 있음을 보여주고 있다.^{[16],[17]}

원복굴절은 광섬유를 비틀거나 자기장의 영향으로 발생한다. 자기장의 영향으로 발생하는 원복굴절의 경우, 빛이 전파되는 방향에 자기장을 인가하면, 광활성에 의해 자기장의 방향과 강도에 따라 편광을 회전시키는 Faraday 효과가 발생하고, 이러한 Faraday 효과에 의해 원복굴절이 발생한다. 여기서, Faraday 효과에 의한 Faraday 회전각 Φ_F 는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_F = V \int_l \bar{H} \cdot d\bar{l} \quad (1)$$

여기서, \bar{l} 은 빛의 진행 경로이고 V 는 광섬유의 Verdet 상수로 매질과 빛의 파장에 따라 변하는 값을 나타낸다.

또한, 비틀림에 의한 원복굴절은 탄성광학효과(Elasto-optic effect)에 의한 것으로, 이는 비틀림 율에 비례하

며, 광활성을 좌원편광 및 우원편광사이의 위상차로 생각할 수 있기 때문에, 광섬유 내로 입사한 선편광된 광이 회전하게 된다. 이와 같은 원복굴절은 광섬유 내부에 존재하는 선복굴절을 억제하는 효과를 가지며, 따라서 Faraday 효과에 의한 Faraday 회전을 보다 정확히 측정할 수 있다.

III. 광섬유 전류 센서의 측정원리

편광측정법에 의해 전류를 측정하는 방법은 Faraday 효과를 이용하여, 인가전류에 의해 발생한 자기장에 비례하는 편광의 회전각을 측정하는 것이다.^[13] 앞장에서 설명한 것처럼, 일반적으로 광섬유에는 선복굴절이 존재하며, 따라서 센싱 광섬유 상에는 선복굴절 및 원복굴절이 중첩되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 선복굴절과 원복굴절의 중첩으로 인해 선복굴절이 상대적으로 크게 되면, 자기장에 의해서 발생하는 원복굴절은 상대적으로 작아지므로 Faraday 회전을 측정하는 것이 쉽지 않다. 따라서 원복굴절을 상대적으로 크게 하기 위하여, 센싱 광섬유를 비틀거나 선복굴절이 아주 작은 저복굴절 광섬유를 이용함으로써 자기장에 의한 Faraday 효과를 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 센싱 광섬유에 비틀림을 가하는 대신, 저복굴절 광섬유를 이용하여 선복굴절의 영향을 최소화시킨다.

(1)식에 나타낸 Faraday 회전의 경우, 광학 매질 내로 전파되는 선편광된 빛의 편광각 Φ_F 가 자기장 \vec{H} 의 영향으로 회전하게 되는데, 여기서 \vec{H} 는 인가된 전류에 의해 발생한다. 만약 광경로가 페루프를 이루고, 도선에 N 의 권선수로 센싱 광섬유를 감았다면, (1)식은 다음으로 표현될 것이다.

$$\Phi_F = V \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = VNI \quad (2)$$

여기서, I 는 인가된 전류이고 N 은 센싱 광섬유의 권선수이다.

그림 1에 나타낸 P-FOCS를 구성할 경우, 센싱 광섬유 상에는 선복굴절과 동시에 Faraday 효과에 의해 야기된 원복굴절이 존재하게 되며, 두 가지의 복굴절이 중첩된 것으로 생각할 수 있다. 따라서 센싱 광섬유에 대한 입력 광(\vec{E}_{input})과 출력 광(\vec{E}_{output})사이의 관계는

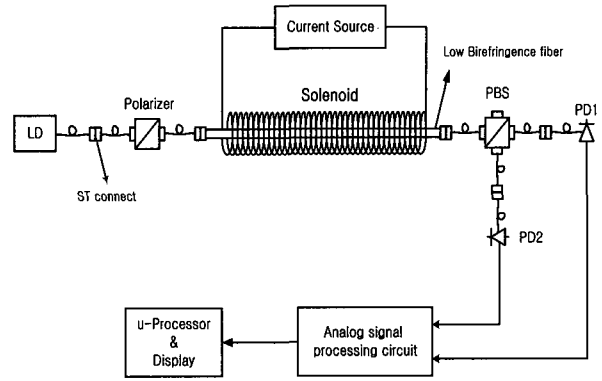


그림 1. 편광형 광섬유 전류 센서의 구성도
Fig. 1. Diagram of P-FOCS.

중첩된 복굴절에 의한 Jones 행렬로 다음과 같이 표현된다.^[15]

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{output} = \begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{input} \quad (3)$$

여기서,

$$A = \cos(\phi/2) + j\cos\chi\sin(\phi/2) \quad (4)$$

$$B = \sin\chi\sin(\phi/2) \quad (5)$$

$$\phi^2 = \rho^2 + (2\Phi_F)^2 \quad (6)$$

$$\tan\chi = \frac{2\Phi_F}{\rho} \quad (7)$$

여기서, ρ 는 선복굴절 항이고 Φ_F 는 원복굴절 항 그리고 ϕ 는 선복굴절 및 원복굴절이 중첩된 항을 표현한다.

$x-y$ 좌표 상에서, 광섬유의 x 축에 대한 θ 의 각도로 입사하는 광을 고려하고, 광섬유 출력은 x 축에 대하여 광 검출기를 θ_1 의 위치에서 측정했을 때, 출력 광은 Jones 행렬 계산에 의해 다음으로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{x\theta} \\ E_{y\theta} \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos^2\theta_1 & \cos\theta_1\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1\sin\theta_1 & \cos^2\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

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

$$P_1 = \frac{P_0}{2} (1 + \sin\chi\sin\phi) \quad (9)$$

$$P_2 = \frac{P_0}{2} (1 - \sin\chi \sin\phi) \quad (10)$$

따라서 편광도(Degree of Polarization) T 는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{2\Phi_F}{\phi} \sin\phi \quad (11)$$

여기서, 선복굴절 $\rho \ll 1$ 인 경우, (6)식에 의해 $\phi \approx 2\Phi_F$ 로 나타낼 수 있으며, $\Phi_F \ll 1$ 인 경우, (11)식의 T 는 다음으로 근사화된다.

$$T \approx 2\Phi_F = 2VNI \quad (12)$$

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

IV. P-FOCS의 신호처리

일반적으로, P-FOCS의 출력 광 신호는 dc 및 ac 성분이 포함된 (9)와 (10)식으로 표현되며, 만약 선복굴절 ρ 가 아주 작다고 가정하면, 이는 다시 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = \frac{P_0}{2} (1 + \sin 2\Phi_F) \quad (13)$$

$$P_2 = \frac{P_0}{2} (1 - \sin 2\Phi_F) \quad (14)$$

여기서, dc 성분은 $\frac{P_0}{2}$ 이고 ac 성분은 $\pm \frac{P_0}{2} \sin 2\Phi_F$ 이다. 만약 P-FOCS에서 발생하는 광량의 변화 즉, 광학소자들의 연결부에서의 손실로 인한 출력 광의 변화를 고려할 경우, 출력 광의 세기는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$P_1 = E_1 \frac{P_0}{2} (1 + \sin 2\Phi_F) \quad (15)$$

$$P_2 = E_2 \frac{P_0}{2} (1 - \sin 2\Phi_F) \quad (16)$$

여기서, E_1 과 E_2 는 각각 P-FOCS에서 유발된 광 출력

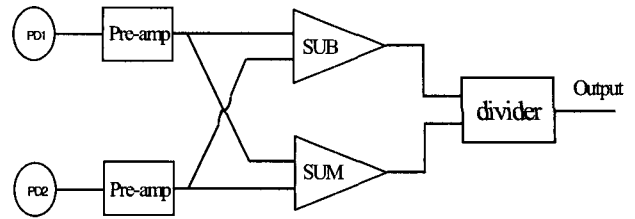


그림 2. 기존 광섬유 전류센서의 아날로그 신호처리 블록도

Fig. 2. Block diagram for conventional analog signal processing of FOCS.

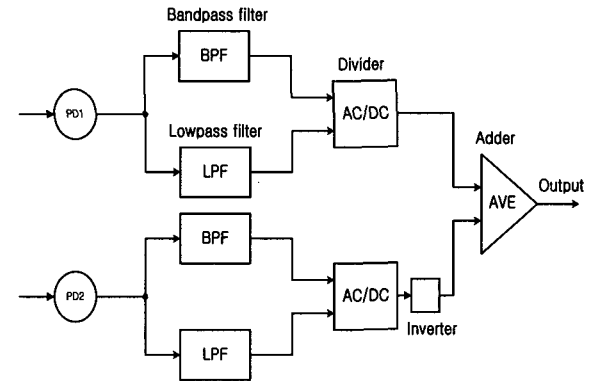


그림 3. P-FOCS의 아날로그 신호처리 블록도

Fig. 3. Block diagram for analog signal processing of P-FOCS.

의 변화량을 나타낸다. 따라서 그림 2에 나타낸 기존의 아날로그 신호처리회로를 이용하여 편광도를 측정한다면, 다음에 나타낸 (17)식과 같이 편광도 T 는 E_1 과 E_2 에 의존하는 함수가 됨으로 손실 등에 의해 안정한 편광도를 측정할 수 없다.

$$T = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{(E_1 - E_2) + (E_1 + E_2)\sin 2\Phi_F}{(E_1 + E_2) + (E_1 - E_2)\sin 2\Phi_F} \quad (17)$$

하지만, 그림 3의 경우를 고려해 보면, 대역 통과 필터 및 저대역 통과 필터를 사용하여 각각의 ac 및 dc 성분을 검출하고, 광량의 변화에 따른 편광도의 변화를 없애기 위해 ac 성분을 dc 성분으로 각각 나누어줌으로서 E_1 , E_2 의 변화에 무관한 편광도를 얻을 수 있다. 이는 (18)식에 나타낸 것처럼, 광량 변화에 대한 성분들을 완전히 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 편광도의 감도를 2배 증가시킴을 알 수 있다.

$$T = \frac{ac_1}{dc_1} - \frac{ac_2}{dc_2} = 2\sin 2\Phi_F \quad (18)$$

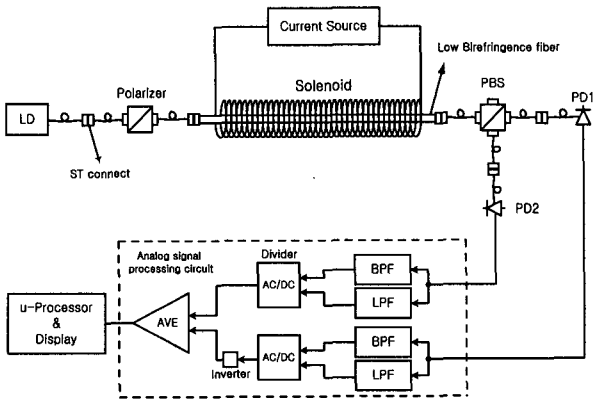


그림 4. P-FOCS의 전체 실험 구성도
Fig. 4. Experimental diagram of P-FOCS.

표 2. 실험 구성목록

Table 2. Components of experiment.

	제조사	Part No.	Wavelength
LD	PD-LD Inc.	PL63C	Min - Max 625 - 640nm
PD	PD-LD Inc.	PDSIU	Min - Max 400 - 1100nm
LB	Oxford Electronics Inc.	LB600	633nm
Polarizer	OZ-optics Inc.	FOP-11-11-633	633nm
PBS	OZ-optics Inc.	58001-1	

V. P-FOCS의 Prototype 제작 및 특성 고찰

그림 4는 P-FOCS의 전체 실험 구성도를 나타내고 있다. 광원은 파장 $\lambda = 632.8nm$, 출력 $1mW$ 의 레이저 다이오드(LD)를 사용하였으며, 센싱 광섬유는 Oxford Electronics사의 LB-600 저복굴절 광섬유를 사용하였고, 솔레노이드 중앙에 일직선으로 위치시켰다. 또한 전류원은 직경이 $3mm$ 인 에나멜 구리선을 이용하여, 권선수가 1500인 솔레노이드를 제작하여 ac 가변 전압원과 트랜스를 조합하여 구성하였다.

그림 4에서 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 편광 빔 분할기(PBS)를 통해 두 개의 직교 성분으로 나누어 각각 광 검출기 PD1과 PD2를 이용하여 광 신호를 검출한다. 각각의 광 검출기에 의해 검출된 광 신호들은 IV장에서 설명한 신호처리 회로를 통해 편광도 T 을 계산하게 되고, 계산된 T 값은 마이크로프로세서를 이용하여 Φ_F 에 비례하는 전류

표 3. 전류원 구성목록

Table 3. Components of current source.

AC variable voltage power supply	AC transformer	Solenoid
Model : ED-345BM	Capacity : 800 VA, 50/60Hz	Turns : 1500
	Primary : 220V, 3.36A	총 수 : 10
	Secondary : 20V, 60A	

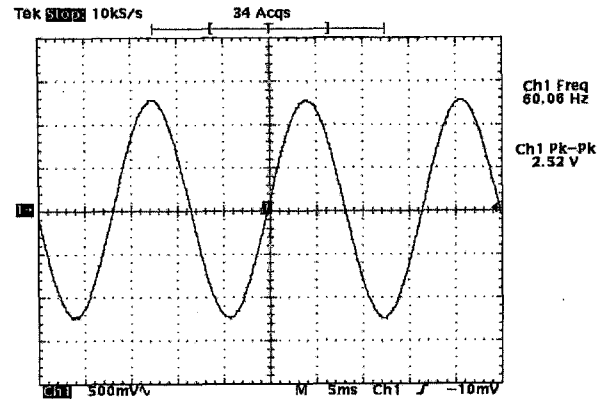
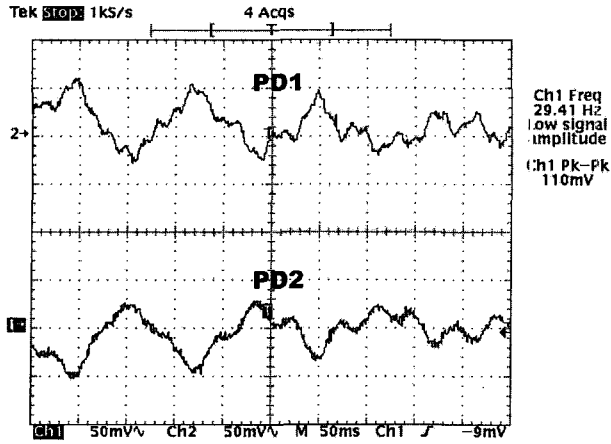


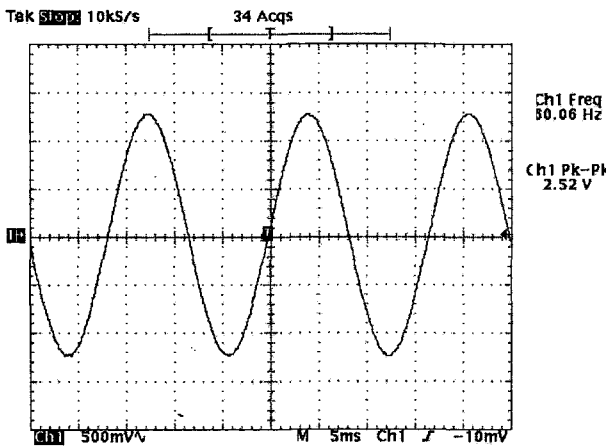
그림 6. $I = 6000A$ 일 때, 아날로그 신호처리회로의 최종 출력 신호
Fig. 6. At the $I = 6000A$, the final output signal of analog signal processing circuit.

I 을 디스플레이 한다. 여기서 전류원은 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. 또한, 벌크한 광학소자로 인한 광 손실을 줄이기 위해 사용된 전 광섬유 소자의 목록은 표 2에 나타내었으며, 전류원 구성목록은 표 3에 나타내었다.

그림 5는 $6000A$ 의 전류에 대한 PD1과 PD2의 초단에서의 광 출력을 측정된 것이다. 사용한 전류원의 전류가 대전류일수록 안정된 출력 신호를 얻을 수 있었으며, 이는 출력 신호의 크기가 잡음의 원인이 될 수 있는 전원 잡음보다 큰 신호로 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 그림 6의 결과는 divider를 거친 아날로그 신호처리회로의 출력을 측정된 것이며, 그림 7은 상대적으로 낮은 $100A$ 의 전류에 대한 출력 신호로, 전류원의 전류가 저전류로 갈수록 신호 대 잡음비가 상대적으로 낮아져 높은 오차율을 보였다. 그림 8은 IV장에서 설명한 신호처리회로의 효과를 나타내는 것으로, 그림 2에 대한 (17)식에서 편광기, 편광 빔 분할기의 오정렬



(a)



(b)

그림 8. 해머 충격 시 출력 신호 : (a) $I = 6000A$ 일 때, PD1, PD2의 출력 신호, (b) $I = 6000A$ 일 때, 아날로그 신호처리회로의 최종 출력 신호

Fig. 8. When struck by hammer, the output signal : (a) At the $I = 6000A$, the output signal of PD1 and PD2, (b) At the $I = 6000A$, the final output signal of analog signal processing circuit.

및 진동 등으로 인한 공통모드 신호의 효과는 광 출력의 변화량을 나타내는 E_1, E_2 에 종속임을 알 수 있다. 하지만, 그림 3의 P-FOCS의 아날로그 신호처리 방식을 이용함으로써 (18)식에서 보는 바와 같이 E_1, E_2 에 무관한 형태를 얻을 수 있으며, 이를 통해 편광기와 편광 빔 분할기의 오정렬 및 진동으로 인한 공통모드 신호를 효과적으로 제거할 수 있다. 그림 8(a)는 6000A의 전류에 대하여, 해머 충격을 주었을 때 PD1과 PD2의 초단에서 광 출력을 측정했으므로, 진동에 의한 출력 신호의 영향을 보여주고 있다. 반면, 그림 8(b)는 이

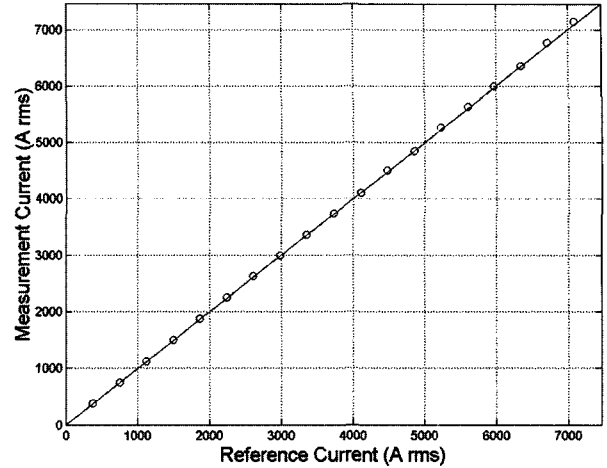


그림 9. 기준 전류 대 측정 전류의 선형성

Fig. 9. Linearity of measurement current vs. reference current.

러한 진동으로 인해 발생한 공통모드 신호를 효과적으로 제거한 결과를 보여주고 있으며, 이는 해머 충격을 가하지 않은 아날로그 신호처리 회로의 최종 출력과 동일한 결과를 나타내고 있다.

그림 9는 기준 전류에 대한 측정 전류의 선형성을 나타낸 것으로, 기준 전류는 전류원으로 사용한 솔레노이드의 내부에서 발생하는 자기장을 가우스 메타로 측정하여 전류치로 환산한 값을 사용하였다. 또한, Faraday 회전각과 인가 전류는 거의 선형적인 관계를 가지기 때문에, 기준 전류에 대한 측정 전류의 선형성 실험은 특정 전류치에서 calibration한 후, 인가 전류를 변화시켜 가며 수행하였으며, 그 결과, 대략 1000에서 6500A까지의 범위에서는 양호한 선형성을 보였으며, 최대 측정오차는 1% 미만으로 관찰되었다. 하지만, 1000A 미만의 상대적으로 낮은 전류에서의 최대 측정오차는 약 3%보다 높게 측정되었으며, 1000A - 7500A 범위 내에서 P-FOCS의 최대 측정오차는 약 1.5%로 측정되었다.

P-FOCS의 광 신호 전송로의 역할을 하는 리드 광섬유에서 복굴절 변화로 인해 편광도 T 에서 dc 성분이 발생하고, 감도 저하를 유발한다. 따라서 이와 같은 감도 저하로 인한 측정 전류의 오차를 보상하기 위해, dc 성분을 측정된 후, 마이크로프로세서로 ac 신호에 수치적 보정항을 고려하여 감도 변화에 따른 측정 전류의 오차를 보정했다. 또한, P-FOCS를 초기화시킬 수 있는 리셋 기능(START/STOP 키)과 측정 전류를 수치적 형태로 환산하여 실시간으로 나타내기 위해, 8051 마이크로프로세서를 사용하였다.

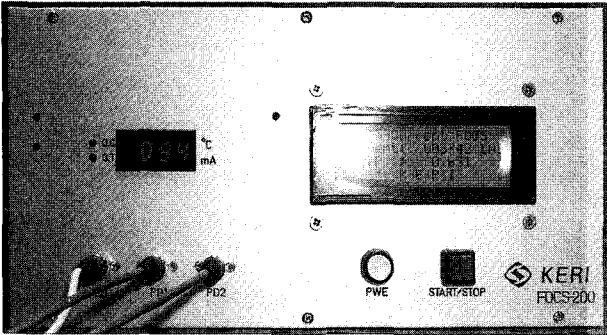


그림 10. 제작된 P-FOCS Prototype(FOCS-200)
 Fig. 10. Fabricated P-FOCS Prototype(FOCS-200).

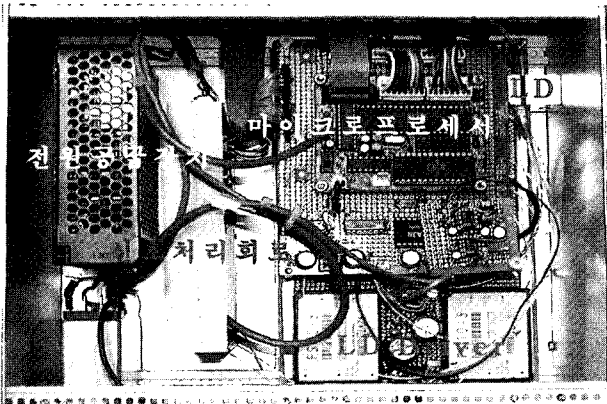


그림 11. FOCS-200의 내부구조
 Fig. 11. Internal structure of FOCS-200.

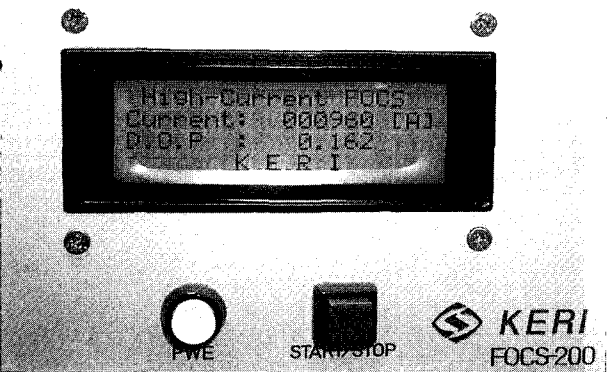


그림 12. FOCS-200에 의해 측정된 전류 표시
 Fig. 12. Measurement current display by FOCS-200.

LD에서 나온 광 신호를 리드 광섬유를 통해 센싱 헤드와의 연결을 용이하게 하기 위해 LD 단자 및 리드 광섬유 그리고 센싱 광섬유 끝에 ST형 커넥터를 달았으며, PD1과 PD2로 입력되는 광 신호 또한, ST형 커넥터를 이용해 연결을 편리하게 했으며, 제작된 P-FOCS Prototype(FOCS-200)을 소형·경량으로 제작하여 이동성을 높였다.

그림 10은 실제 제작된 P-FOCS Prototype인

FOCS-200으로, 패널 앞의 왼쪽 표시부는 온도에 따른 LD의 구동 전류를 표시한 것이고, 오른쪽 표시부는 측정된 편광도와 계산된 전류 값을 나타내고 있다. 또한, PD1과 PD2 단자는 리드 광섬유를 통한 FOCS-200의 아날로그 신호처리회로의 광 신호 입력을 나타내고, LD 단자는 센싱 헤드로 입사되는 광원의 입력단을 나타낸다. 그림 11은 FOCS-200의 내부 구조로 전원공급 장치인 전원부와 LD 구동부 그리고 아날로그 신호처리회로 및 마이크로프로세서의 배치를 보여주고 있다. 그림 12는 FOCS-200의 표시부 상에 PD1과 PD2에서 측정된 광 신호의 강도 비를 나타내는 편광도와 계산된 전류값을 나타내고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 저복굴절 광섬유를 이용한 전 광섬유 P-FOCS의 Prototype을 제작하여 그 특성을 실험하였다. 저복굴절 광섬유의 사용은, P-FOCS Prototype인 FOCS-200의 측정 전류 오차의 원인이 되는 센싱 광섬유의 복굴절 문제를 줄이기 위해서이고 또한, 벌크 광학 소자들로 인해 발생하는 광 손실을 줄이기 위해, 전 광섬유 소자를 사용하였다. 하지만, 전 광섬유 소자들을 결합시키는 커넥터의 광 손실로 인한 측정 결과의 오차는, 광량 변화에 따른 출력 신호 안정화 회로를 구성하여 측정 결과의 신뢰도를 높였다.

FOCS-200을 이용하여 측정된 전류의 선형성 오차는 1000A 이하의 저전류인 경우, 3%이상으로 비교적 높게 나타났으나, 1000 - 7500A 에서는 1.5% 이내로 측정되었다. 또한, 제작된 FOCS-200은 경량·소형으로 이동성이 뛰어나고, FOCS-200의 초기화를 위해 리셋 기능을 추가하였고, 측정 전류를 실시간으로 표시함으로써 실제 필드 상에서의 적용 가능성을 확인하였다.

하지만, P-FOCS의 상용화를 위해 우선 해결해야 할 문제는 온도 및 진동과 같은 외부 환경 변화에 대한 출력 특성 변화와 출력 특성의 안정화 및 신뢰성 확보에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

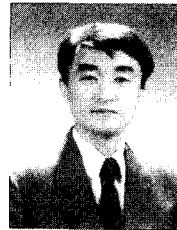
- [1] Fabien Briffod, Luc Thevenaz, Pierre-Alain Nicati, Alain Kung, and Philippe A. Robert, "Polarimetric current sensor using an in-line

- Faraday rotator," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E83-C, no. 3, pp. 331-335, March 2000.
- [2] B. C. B. Chu, Y. N. Ning, and D. A. Jackson, "Faraday current sensor that uses a triangular-shaped bulk-optic sensing element," *Optics Letters*, Vol. 17, no. 16, pp. 1167-1169, 15 August 1992.
- [3] Moon Fuk Chan, Guansan Chen, M. Suleyman Demokan, Hwa Yaw Tam, "Optimal sensing of current based on an extrinsic Sagnac interferometer configuration," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 30, pp. 17-24, 1998.
- [4] Ian G. Clarke, "Temperature-stable: spun elliptical-core optical-fiber current transducer," *Optics Letters*, Vol. 18, no. 2, pp. 158-160, 15 January 1993.
- [5] A. Papp and H. Harms, "Magneto-optical current transformer. 1 : Principles," *Applied Optics*, Vol. 19, no. 22, pp. 3729-3734, 15 November 1980.
- [6] H. Aulich, W. Beck, N. Douklias, A. Papp, and H. Schneider, "Magneto-optical current transformer. 2 : Components," *Applied Optics*, Vol. 19, no. 22, pp. 3735-3740, 15 November 1980.
- [7] Natale C. Pistoni and Mario Martinelli, "Vibration-insensitive fiber-optic current sensor," *Optics Letters*, Vol. 18, no. 4, pp. 314-316, 15 February 1993.
- [8] <http://www.nxtphase.com/pdfs/NXCT-EPMI-optical-ct-for-high-voltage-applications.pdf>
- [9] Hyun Seo Kang, Jong Hun Lee and Kyung Shik Lee, "A stabilization method of the Sagnac optical fiber current sensor with twist control," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, no. 10, pp. 1464-1466, 1998.
- [10] 이명래, 이용희, 김만식, "수직원형틀을 이용한 광섬유전류센서의 동작특성," *한국광학회 논문지*, 제 7권, 제4호, 419-427쪽, 1996년 12월
- [11] A. M. Smith, "Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber," *Applied Optics*, Vol. 19, no. 15, pp. 2606-2611, 1980.
- [12] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode optical fiber," *Applied Optics*, Vol. 18, no. 13, pp. 2241-2251, 1979.
- [13] 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.
- [14] David N. Payne, Arthur, J. Barlow, and Jens J. Ramskov Hansen, "Development of low- and high-birefringence optical fibers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-18, no. 4, pp. 477-488, April 1982.
- [15] 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.
- [16] A. H. Rose, Z. B. Ren, and G. W. Day, "Twisting and annealing optical fiber for current sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, no. 11, pp. 2492-2498, November 1996.
- [17] H. S. Lassing, A. A. M. Oomens, and R. Woltjer, P. C. T. van der Laan and G. G. Wolzak, "Development of a magneto-optic current sensor for high, pulsed currents," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 57, no. 5, pp. 851-854, May 1986.

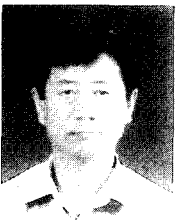
저 자 소 개



장 남 영(정회원)
 1998년 창원대학교
 전자공학과 공학사
 2001년 창원대학교
 전자공학과 공학석사
 2001년~현재 창원대학교
 전자공학과 박사과정
 <주관심분야: 광섬유센서, 광계
 측, 광신호처리, 홀로그래피>



은 재 정(정회원)
 1982년 연세대학교 전자공학과
 공학사
 1986년 연세대학교 전자공학과
 공학석사
 1994년 연세대학교 전자공학과
 공학박사
 현재 창원대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야: 광섬유센서, 광계측, ESPI, 광신호처리>



최 평 석(정회원)
 1978년 성균관대학교
 전자공학과 공학사
 1980년 연세대학교
 전자공학과 공학석사
 1985년 연세대학교
 전자공학과 공학박사
 1979년~1986년 유한공업전문대학
 전자과 조교수

1986년~현재 창원대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야: 광신호처리, 광섬유센서, 홀로그래피>



박 해 수(정회원)
 1987년 경북대학교 전자공학과
 공학사
 1994년 경남대학교 전자공학과
 공학석사
 현재 한국전기연구원 전기정보망
 기술연구그룹 선임연구원
 <주관심분야: 광섬유센서, 광계측>