

BSO와 ZnSe를 광 변조기로 이용한 전류센서에 관한 연구

(A Study on the Current Sensor Using an Optical Modulator With BSO & ZnSe)

金 堯 禧*, 李 大 寧**

(Yo Hee Kim and Dai Young Lee)

要 約

본 논문은 BSO 단결정과 ZnSe 다결정을 파라데이 소자로 이용하여 자기광학 변조기를 설계하고, 순철과 퍼멀로이를 이용하여 코아형 광전류 센서를 제작하고 실험한 내용이다. 광원은 LED(NEC, OD-8358, $0.87\mu\text{m}$), 광수신은 PIN-PD(OD-8454), 전송로로 다중모드 광섬유 ($100/140\mu\text{m}$)를 사용하여 효과적인 자기신호검출 방법을 제시하였다. 실험에 앞서 Stokes Parameter로 편광자에서의 특성행렬을 구하고 Mueller 행렬을 이용 광학소자 배열에서의 광변조 특성식을 유도하였다. 전자계 해석 프로그램 (FLUX 2D, $\mu\text{VAX 3600}$)에 의해 코아내 주변에서의 자속밀도를 유한 요소법으로 구하였다. 입력 전류에 대한 출력전압의 직선성을 알아본 결과 50A~1,000A에서 측정 오차는 5% 이하로 나타났다. 센서의 온도 특성을 시험결과 -20°C ~ 60°C 에서 최대 0.5%의 오차로 양호한 온도특성을 보여 주었다. 시스템 전체에서의 SNR를 실험한 결과 도체 전류가 600A (250.20e)의 경우 47dB로써 내잡음성이 우수하였다.

Abstract

In this paper, a magneto-optic modulator has been designed by using single crystal BSO and polycrystal ZnSe as Faraday cells. And practical core-type optical current sensors using pure iron and permalloy have been prepared and experimented. In order to obtain efficient magnetic field detection, LED (NEC OD-8358, $0.87\mu\text{m}$) was used as optical source, PIN-PD (OD-8454) as optical receiver and multi-mode optical fiber ($100/140\mu\text{m}$) as transmission line. The characteristic matrix of the optical element was calculated by Stokes parameter, and optic modulation characteristic equations were derived by Muller matrix. Electromagnetic analysis program (FLUX 2D, microVAX 3600) by finite element method was used to find the magnetic flux density around the core.

The measuring error of the output voltage to input current has been measured below 5% in the range of 50A to 1000A. As the temperature was changed from -20°C to 60°C , the maximum measurement error of the optical output has been found to be 0.5% at 60°C . These experimental results show good temperature and linearity characteristics. The SNR of the overall system was 47dB in case of 600A (250.2 0e) conductor current and the system has good noise immunity.

*正會員, 韓國電氣研究所
(Korea Electrotechnology Research Institute)

**正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)
接受日字: 1991年 5月 21日

I. 서 론

레이저 광이 계측의 수단으로 이용되는 것은 광이 갖고 있는 간섭성, 방향성등이 우수해서 광섬유와 같은 도파관을 통하여 효율 좋게 전송할 수 있고 용이

하게 변조시킬 수 있기 때문이다!^{12,3)} 전력계통에서 절연매체인 광섬유를 전파하는 빛은 전자 유도장애 등 매우 조건이 나쁜 전기환경에서도 이상적인 계측 방식으로 사용할 수 있다. 그리고 전력수요가 증가함에 따라 전력 계통은 대용량화, 고압화 되고 있어 기존의 계측방식을 새로운 방식으로서의 대체가 고려되고 있다!^{4,5)}

즉 기존의 교류 대전류 계측방식은 철심의 전자유도를 이용하기 때문에 구조가 간단하고 신뢰성 그리고 수 KHz까지의 주파수 특성이 양호한 편이다. 그러나 최근 계통전압이 점점 커지고 보호, 감시등 다 목적으로 사용하려면 기존의 전류계측 방식인 CT는 대형화되지 않으면 안되고 가격, 보수등의 문제가 뒤따른다. 또 철심을 사용하기 때문에 고장시 대전류에 의한 철심의 자기포화 등으로 오차가 커지고 직류성 전류 및 수 ns간의 짧은 교류 펄스 전류 측정이 불가능한 면이 있다. 이러한 문제등을 해결하기 위해서 고압부분에 변류기를 설치하고 트랜스듀서등으로 계측 변화해서 이를 부호화하고 광변조해서 요구하는 장소에 무선전송할 수 있는 방법등이 검토되어 왔으나 절연상 문제는 해결 되겠지만 고압부분에 다수의 능동소자를 필요로 하므로 신뢰성, 보수상 어려움이 따른다!^{6,7)} 그러나 자계광학 효과를 갖고 있는 파라데이 소자등을 고압부에 설치하고 가스 레이저등으로 공간전송하므로써 자계에 따른 광 변환분을 측정할 수 있다. 이 방식은 도체주위에 민감한 연그라스등을 설치하고 자계의 세기에 따라 광학적으로 편파면을 검출하는 방식으로 고압부에 능동소자를 설치할 필요가 없고 비접촉형, 절연등 장점은 있으나 공간전송에 의한 신뢰성, 정확도등이 문제로 남아 있다!^{8,9,10,11)} 저손실의 광섬유가 개발되면서 전송로를 광섬유로 이용할 수 있게 되었고 편광성분을 유지하면서 센싱과 전송로를 이용한 순수한 광섬유만을 이용한 센서에 대한 연구가 활발히 연구중이다!¹²⁻¹⁷⁾ 그러나 전류를 측정하기 위해서는 낮은 고유 복굴절을 가져야 하는데 제조상 열적응력(thermal stress) 및 코아의 타원성에 의해 위상지연이 생기게 되어 실용성에 어려움이 따른다.

그러나 특성이 좋은 광 부품 및 주변기기등이 개발되면서 GIS 또는 보호시스템에 대한 적용 연구등이 활발하게 되어 앞으로 더욱 정밀하고 고신뢰성의 시스템을 구성할 수 있게 되었다!¹⁸⁻²³⁾ 본 논문에서는 자기 광학소자가 연 그라스 및 BGO 보다 파라데이 회전성(Verdet 상수), 선광성, 온도특성, 내 잡음 특성이 우수한 BSO, ZnSe를 복합한 크리스탈 센서를 자계센서로 구성하였다. 선광자 및 편광자에서의

Stokes Parameter와 Mueller 행렬로 광변조식을 유도하였고 센서내의 소자배열에서의 Faraday 효과론적으로 해석하였다. 그리고 실용화에 편리하게끔 코아의 재질은 순철과 퍼멀로이로 코아형 센서를 구성하였고 코아에 대 전류를 공급하였을 때 공극 주변에서의 자계 특성, 센서가 갖는 직선성, 온도특성을 조사 하였다. 전체적인 시스템 SNR을 개선 할 수 있도록 신호 검출회로를 설계 하였고 SNR을 이론치와 실측치를 비교 분석하고 열악한 전기환경에서도 실용화할 수 있는 광전류 계측 시스템을 구현 하였다.

II. 광학소자 배열에서의 Faraday 효과

Faraday 효과를 가지는 매질에서 굴절율은 자계의 세기에 의해 달라진다. 따라서 광의 강도변화로 전류를 측정할 수 있다. Faraday 효과를 표현하는 식은 다음과 같다!²⁴⁾

$$n_r - n_l = \lambda VH / \pi \tag{1}$$

여기서 n_r 은 오른쪽 방향으로 원편광된 빛의 굴절율이고, n_l 은 왼쪽방향으로 원편광된 빛의 굴절율이다. 또 λ 는 빛의 파장, V는 Verdet상수, H는 자계의 세기이다. 식(1)은 자계의 방향이 빛의 진행방향과 같다고 가정할 경우이다. Faraday 센서의 길이가 L 일 경우 회전각 δ 는 다음 식(2)가 된다.

$$\delta = K \int_0^L (n_r - n_l) dl \tag{2}$$

여기서 K는 파수(Wave Number) 이다. 식(2)를 식(1)에 대입하면

$$\delta = K \int_0^L \frac{\lambda VH}{\pi} dl \tag{3}$$

이 되고, $K = 2\pi / \lambda$ 이므로

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda VH}{\pi} \right) \ell' \\ &= 2VH \ell' \end{aligned} \tag{4}$$

이 되고 여기서 ℓ' 는 유효 광로장으로 자계와 빛의 전파방향이 일치할 경우 $\ell' = L$ 이 된다. 식(4)는 매질이 광학적인 편광회전을 일으킴을 가르킨다. 광전류계측에서 검출되는 편광회전량 δ 는 검광자를 거쳐 광의 강도(Intensity)로서 나타난다.

광의 편광에 사용되는 광학소자의 효과를 해석하는 수학적 방법에는 Jones법과 Mueller법, 두가지가 있으므로 이러한 두방법 모두 광을 벡터로서 표현하며, 여러가지 광학소자의 특성을 행렬로 표시할 수

있다. 광의 전계의 두 성분을 나타내면

$$\vec{E} = E_y \vec{e}_y + E_z \vec{e}_z \quad (5)$$

이며, 여기서 \vec{e}_y 와 \vec{e}_z 는 단위 벡터이다.

위에서 전계의 두 성분을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_y = a \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$E_z = b \cos(kx - \omega t + \delta) \quad (7)$$

여기서 a, b는 전계성분의 최대진폭이다. 간략하게 식(6)과 식(7)을 새로운 변수 $\theta = kx - \omega t$ 의 함수로 다시 쓸 수 있다.

$$E_y = a \cos \theta \quad (8)$$

$$E_z = b \cos(\theta + \delta) \quad (9)$$

Jones 법에서 광의 상태를 표현하는 벡터 A는

$$A = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \text{Re} \begin{bmatrix} a e^{i\theta} \\ b e^{i(\theta + \delta)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

가 되는데 $e^{i\theta}$ 항은 여러 광소자의 영향으로 나타나는 값으로 무시할 수 있고 행렬에서의 실수부분에 의해 전계벡터가 형성되므로 일반적인 Jones 벡터 A_j 의 형태는 다음과 같다.

$$A_j = \begin{bmatrix} a \\ b e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

각각의 광소자의 Jones 벡터는 2x2행렬로 표현되며, 광시스템에서의 빛의 전파효과는 각 행렬의 곱으로 얻을 수 있다. 광의 상태를 표현하는 4개의 Stokes Parameter로 형성된 벡터 A_s 로서 광의 강도 변화를 구할 수 있다.^[25]

$$A_s = \begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 + b^2 \\ a^2 - b^2 \\ 2ab \cos \delta \\ 2ab \sin \delta \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 I는 광의 강도 (Intensity)를 나타내고 있으며, 기본적인 광전류계측 시스템에서는 변조된 전류 신호를 광강도로 검출하는 것이다. 광원에서는 편광되지 않은 자연광을 발생하며 이 광은 0° 방향의 편광자를 통과한 후 45°만큼의 선광성 (Optical Rotatory Power)을 가지는 소자와 Faraday 소자를 거쳐 위상 지연된 광의 강도를 검출하는 검광자를 통과하게 된다. 여기서 검광자는 편광자와 축의 방향이 수직이 되게 구성한다. 이와 같은 일련의 구성을 수식으로 나열하면 다음과 같다.

$$\{A_o\} = P_{90} T_{\sigma_z} T_{45} P_o \{A_i\} \quad (13)$$

여기서 A_i 는 입력 자연광으로써, 행렬의 형태는

$$\{A_i\} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

이고, 선광자와 편광자의 Mueller 행렬을 이용해서 식(13)을 풀면 식(15)와 같이 된다.

$$\{A_o\} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

따라서 출력광 A_o 의 값은 다음과 같이 구해진다.

$$\{A_o\} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 + \sin \delta \\ -(1 + \sin \delta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

식(16)에서 출력광의 강도는

$$I = \frac{1}{4} (1 + \sin \delta) \quad (17)$$

가 된다. 위 식을 최대 강도의 비율로 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$I/Im = \frac{1}{2} (1 + \sin \delta) \quad (18)$$

여기서 Im은 출력 광 강도의 최대값이다. 따라서 식(18)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I/Im = \frac{1}{2} \{1 + \sin(2VHL)\} \quad (19)$$

여기서 $\sin(2VHL)$ 을 Modulation Depth라 하고 m이라 표기한다. 즉 출력광의 강도를 P(I/Im)라 할 때 $m=0$ ($H=0$)일 때 초기광량 $P_o=1/2$ 이 된다. 이러한 관계를 다시 쓰면

$$P = P_0(1+m) \tag{20}$$

이 되어 광 시스템의 특성식이 된다.

Ⅲ. 코아형 광전류 센서 구성

식(15)의 배열과 같이 0° 방향의 편광자, 45° 회전의 선광자, Faraday 소자, 그리고 90° 방향의 검광자를 그림1과 같이 구성하였다.

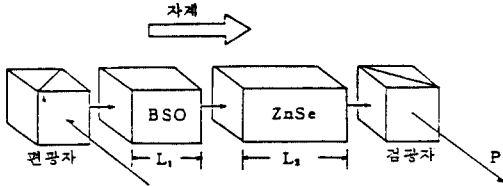


그림 1. 광 전류센서의 내부배열
Fig. 1. Internal schematic configuration of the optical current sensor.

45° 선광자로써 BSO를, Faraday 소자로써 BSO와 ZnSe를 사용하였다. BSO 선광자의 선광성(Optical Rotatory Power)은 0.87μm 파장에서 10.5°/mm로써 π/4 만큼의 광학 바이어스를 주기 위하여 광로장을 4.3mm (10.5°/mm × 4.3mm = 45°)로 정하였고 ZnSe는 광로장을 고려하여 5mm로 하였다.

일반적으로 도체에서 r(m) 떨어진 점에서의 자계의 세기 Hr은

$$H_r = \frac{I}{2\pi r} \text{ (A/m)} \tag{21}$$

가 된다.

코아일부에 센서부 전체길이 만큼의 공극(약 3cm)을 만들고 그림2와 같은 센서부를 공극안에 설치토록 하였다.

이러한 코아형 철심의 공극(gap)에 미치는 자계의 세기 Hg는

$$H_g = \frac{\mu I}{\mu_0 \ell + \mu \ell g} \text{ (A/m)} \tag{22}$$

여기서 μ = μ₀μₛ, μ₀ = 공기의 투자율 (4π × 10⁻⁷ H/m), μₛ = 코아의 비투자율, ℓ = 코아의 연장길이, ℓg = 코아 공극의 길이 이며, μₛ가 1000 이상의 값에서는 Hg의 값이 근사식으로 I/ℓg (A/m)가 된다.

따라서

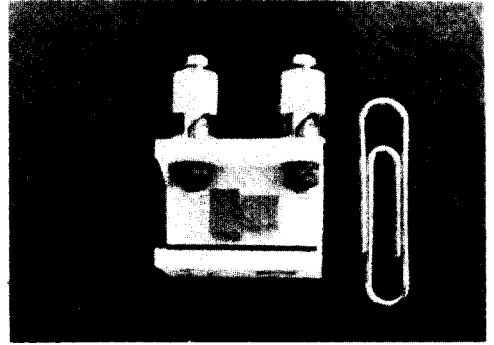


그림 2. 광전류 센서부
Fig. 2. Sensor part of optical current sensor.

$$\frac{H_g}{H_r} = \frac{2\pi r}{\ell g} \tag{23}$$

이 되며 Hg/Hr 값은 2π정도가 되어 코아를 사용하므로써 전류 센서에 미치는 자계의 세기를 2π배 정도 증대시킬 수 있다. 여기에서 코아(순철: μₛ = 4,000)의 비투자율 μₛ에 대한 공극에서의 자계의 세기와의 관계를 보면 그림3과 같다.

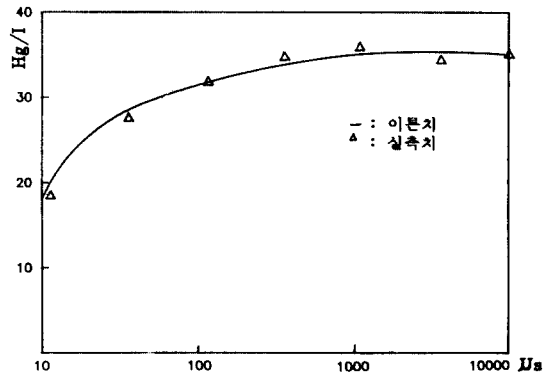


그림 3. μs에 따른 공극에서의 자계의 세기
Fig. 3. Magnetic field intensity in a gap with permeability.

μₛ가 1000 이상의 값에서는 Hg/I 값이 거의 일정한 값이 되어 Hg는 도선에 흐르는 전류에만 영향을 받으므로 μₛ는 Hg의 값에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 코아 및 센서부를 포함한 종합적인 구성은 그림5와 같으며 LED 구동부는 전압센서부에 일정한 세기의 광파워를 공급하기 위하여 안정화

드라이브 회로에 의해 구동되며, 사용된 LED는 일본 NEC사의 OD-8358 모듈로서 파장은 $0.87\mu\text{m}$ 이고 사용 콘넥터는 FC형이며 광섬유는 N.A (numerical apecture)가 큰 $100/140\mu\text{m}$ 다중모드 광섬유를 사용하였다. 그림4는 구성도에 따라 개발한 코아형 광전류 센서의 사진이다. 신호처리부는 검광자를 통한 빛의 강도변화를 포토다이오드를 통해 전기 신호로 검출하는 회로로서 그림5와 같이 구성된다. 그림에서 AC와 DC 성분을 분리하여 나누기를 행함으로써 LED 구동부에서의 전류등의 변화로 광량의 변화에 의한 출력값의 변동을 제거할 수 있다. 즉 식(20)에 DC 성분이 P_0 이고 AC성분이 mP_0 이므로 AC/DC의 값은 m 이 되어 DC 성분의 변화에 의존하지 않고 항상 일정한 값을 유지하게 된다.

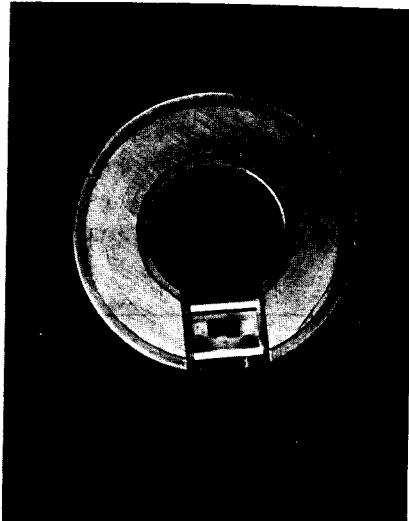


그림 4. 개발제품인 코아형 CT
Fig. 4. Photos of optical CT.

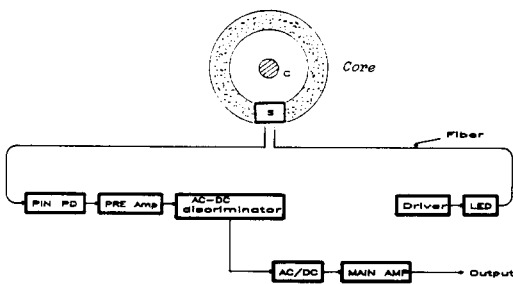


그림 5. 전체 시스템 구성도
Fig. 5. Structure of integrated system.

IV. 실험결과 및 고찰

코아설계를 위하여 내경 50mm 외경 90mm 갭길이 31mm로 하고 갭부에 비자성 재료인 알루미늄을 케이스를 두고 $\mu\text{VAX3600}$ (Flux 2D)을 이용하여 시뮬레이션 해 본결과 그림6과 같은 벡터 자기 포텐셜의 분포를 가짐을 알 수 있었다. 도체 전류를 각각 100A, 1000A일 때 센서가 위치하는 중심부인 6 번째의 벡터자기 포텐셜을 비교해보면 100A일 때는 $0.10487\text{E}-03$ 이고 1000A일 때는 $0.10487\text{E}-02$ 로 되어 시뮬레이션 결과 아주 우수한 비례관계를 가짐을 알 수 있다. 한편, 앞에서 설명된 코아형 광전류 센서의 입력 특성, 온도특성 및 잡음 특성에 대하여 실험한 결과를 고찰해 보면 먼저 코아의 재질을 열처리한 순철 (Fe(T)), 열처리 하지 않은 퍼멀로이 (Per.)와 열처리된 퍼멀로이 (Per(T))의 3가지에 대해 입출력 특성을 측정 한 결과를 그림7에 나타내었다. 여기서 각 재질의 비투자율이 1000이상 이므로 선형성은 비슷하게 나타나는데 순철보다는 퍼멀로이가 약간 감도가 좋은 것을 볼 수 있다. 100A 미만에서는 파라데이 회전각이 미소하여 선형성이 떨어지므로 높은 전류, 특히 수백~수천 암페어의 배전선이나 송전선의 전류측정에 유용할 것으로 사료된다. 그림 8은 입력전류가 1000A일 때의 입출력 파형을 보여주고 있다. 그리고 광전류 센서의 온도특성을 알아보기 위하여 항온조의 온도를 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시키면서 수광부에서 검출되는 출력전압의 변화량을 측정하였다. 그림9에서 BSO & ZnSe의 온도변화 특성이 강자성체 YIG 및 상자성체 FR-5보다 매우 우수함을 알 수 있다.^[26] 그리고 시스템의 S/N을 수식적으로 검토하였다. 수광소자인 PIN-PD에 수광되

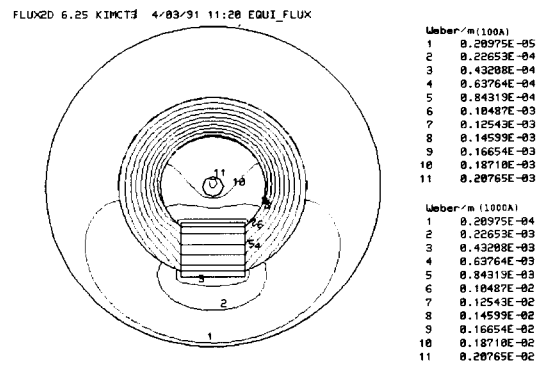


그림 6. 벡터 자기 포텐셜의 분포
Fig. 6. Distribution of vector magnetic potential.

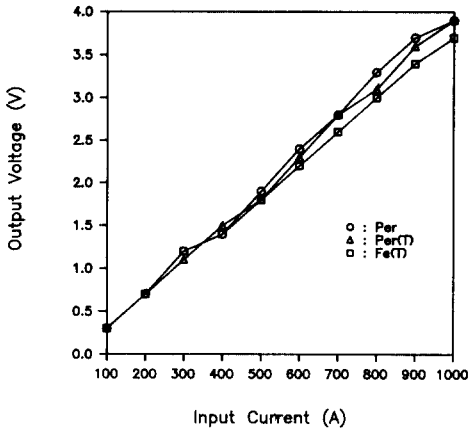


그림 7. 입출력 특성 그래프
 Fig. 7. The characteristics graph of input currents and output voltages.

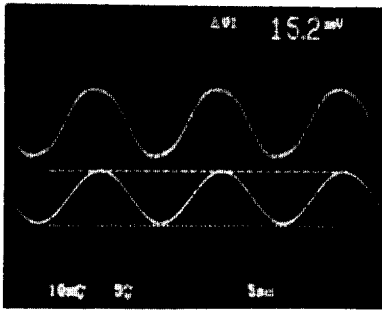


그림 8. 광 전류 센서 입출력 파형 (1000A)
 Fig. 8. Input and output waveforms of optical current sensor.

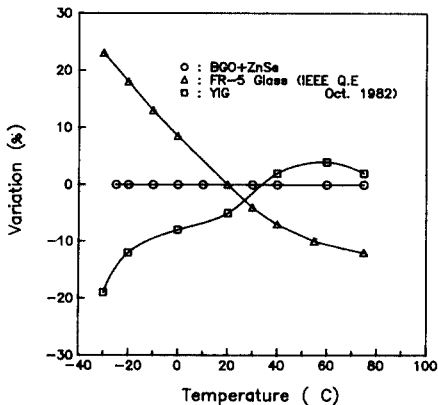


그림 9. 온도변화에 따른 광출력전압 변동
 Fig. 9. Output voltage variation against temperature of the sensor.

는 광량은 식(20)과 같이 되는데 PD (photodiode)의 암 전류를 무시할 때의 전체 잡음N은

$$N = N_{ns} + N_{nt} + N_{ex} \quad (24)$$

여기서, N_{ns} = Shot Noise
 N_{nt} = Thermal Noise
 N_{ex} = Excess Noise

가 되고 이때의 S/N은^[27]

$$\frac{S_{p-p}}{N_{rms}} = \frac{(msP_o)^2}{2e B S P_o + \frac{4KTB}{R_L} + N_{ex}} \quad (25)$$

S : Photodiode의 Sensitivity
 B : Detector의 Bandwidth
 R_L : Detector의 Load Resistance
 N_{ex} : Excess Noise
 K : Boltzman 정수
 T : 절대온도
 e : 전하량
 m : $\sin 2\phi$ (Modulation depth)
 P_o : 수신단 평균 광출력

이 시스템에서 코아 공극에서의 자계H는 $H \approx I/lg$ (AT/m)이고 이들의 값 ($S=0.5A/W$, $B=10KHz$, $R_L=2K\Omega$, $T=300^\circ K$)을 고려했을 때 코아 주변에서의 H와 SNR과의 관계를 이론치와 실측치를 비교하여 그림10에 표시하였다. 선로전류가 200A (38.4 Oe) 이상이 되면 SNR이 37dB 이상이 되어 대전류 계측에 매우 이상적인 것임을 알 수 있다.

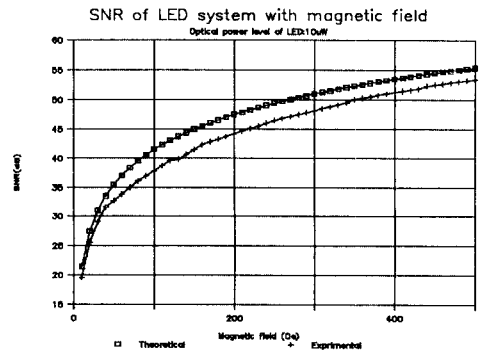


그림 10. 자계의 세기와 SNR과의 관계
 Fig. 10. Relationship between magnetic field and measured SNR.

표 1. BSO와 ZnSe의 특성
Table 1. Property of BSO and ZnSe.

재 료	결정성	Verdet 계수 (min/Oe Cm)	선광성 (deg/mm)	온도특성	굴절률
반자성체	BSO (Bi ₂ SiO ₇)	0.1 (0.87μ)	10.5	<±1% (-13~85°C)	2.43 (0.87μ)
	ZnSe	0.15 (0.87μ)	없음	<±1% (-20~120°C)	2.60 (0.63μ)

V. 결 론

본 논문에서는 BSO와 ZnSe를 복합한 크리스탈 센서를 파라데이 자계센서로 구성하여 열악한 전기 환경에서 실용화할 수 있는 광전류 계측 시스템을 구현하였다. Stock Parameter로 편광자에서의 특성 행렬을 구하고 광학소자 배열에서의 출력광을 Mueller 행렬로 특성식을 유도하였다. 자계세기를 증폭하기 위하여 코아형으로 광전류 센서를 제작한 후 성능을 측정하였다. 코아내 공극에서의 자속과 자속 밀도를 전자계 해석 프로그램(FLUX 2D, μVAX 3600)에 의해 구하였고 온도변화에 따른 광출력의 변화량을 실험한 결과 -20~60°C까지 거의 변화없이 (60°C에서 최대 0.5%의 측정오차) 매우 우수한 온도특성을 보여주었다. 순철과 퍼멀로이로 만든 각각의 코아형 센서에 대하여 광출력 전압을 측정하고 결과 전류범위 50~1000A에서 측정 오차는 5%이하로 나타나 큰 전류범위에서는 우수한 직선성을 보여주었다. 끝으로 이 시스템에서 전체적인 SNR를 이론치와 비교하여 실측하였다. 선로전류 600A의 경우 코아에서의 자계세기는 250.20e이었고 이때 SNR의 실측치는 47dB로써 SNR 특성이 대단히 양호하였다. 앞으로 이 광전류 계측 시스템은 내잡음성, 고절연성, 온도특성 그리고 저전류에서 대전류까지 직선성이 매우 우수하므로 실제통에 그 응용이 매우 기대된다.

參 考 文 獻

[1] A.J. Rogers, "Optical Methods for Measurement of Voltage and current on Power System." Opt. Lasor Tech., p. 273-283, 1977.
 [2] T.G. Giallorenzi, J.A. Bucaro, A. Dandrige, et al., "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-18, no. 4, p. 623-665, 1982.
 [3] T.G. Gilallorenzi, "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE Trans. on Microwave

Tech., vol. MTT-30, no. 4, p. 472, April 1982.
 [4] R.E. Hebner, et al., "Optical Methods of Electrical Measurement at High Voltage Levels," Proc. IEEE, vol. 65, no. 11, p. 1524-1548, 1977.
 [5] M. Kanoi, et al., "Optical Votage and Current Measuring System for Electric Power Systems," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. PWRD-1 no 1, 1986.
 [6] M.N. Rzewuski, et al., "A New Electromagnetic Current Transformer for EHV Power Systems," IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, vol. IM-25, no. 3, 1976.
 [7] L.E. Berkebile, et al., "A New Electromagnetic Current Transformer for EHV Power Apparatus and Systems," vol. PAS-100, no. 4, 1981.
 [8] S. Saito, et al., "8C1-The Laser Current Transformer for EHV Power Transmission Lines," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-2, no. 8, 1966.
 [9] S. Saito, et al., "12.4-Development of the Laser Current Transformer for Extra-High-Voltage Power Transmission lnes," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-3, no. 11, 1967.
 [10] A.J. Rogers, "Optical Technique for Measurement of Current at High Voltage," Proc. IEEE, vol. 120, no. 2, 1972.
 [11] M.N. Rzewuski, et al., "Unconventional Methods of Current Detection and Measurement in EHV and UHV Transmission Systems," IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, vol. IM-24, no. 1, 1975.
 [12] A. Papp, et al., "Magneto-optical Current Transformer. 1: Principles," Applied Opticas, vol. 19, no. 22, 1980.
 [13] H. Aulich, et al., "Magneto-optical Current Transformer. 2; Principles," Applied Opticas, vol. 19, no. 22, 1980
 [14] H. Harms, et al., "Magneto-optical Current Transformer. 3: Principles," Applied Opticas, vol. 19, no. 22, 1980.
 [15] S. Donati, et al., "A Fiber Sensor for Current Measurements in Power Lines," Alta Frequenza. vol. LIII-N. 6 Nov. Dec. p. 310-314, 1984
 [16] V. Annovazzi-Lodi, et al., "Fiber Current Sensors for HV-Lines," SPIE, vol. 798, Fiber Optic Sensors II, 1987

- [17] S. Donati, et al., "Magneto-Optical Fibre Sensors for Electrical Industry: Analysis for Performances," IEEE Proc. vol. 135, no. 5, Oct. 1988.
- [18] T. Sugiyama, et al., "Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magnetic-Field Sensor," IEEE Trans. On Power Delivery, vol. PWRD-2, no. 1, 1987.
- [19] Y. Kuroda, et al., "Field Test of Fiber-Optic Voltage and Current Sensors Applied to Gas Insulated Substation," SPIE vol. 586 Fiber Optic Sensors, 1985.
- [20] A.A. Jaeckin, "Measuring Current at Extra-High Voltage," LF, pp. 35-38, 1970.
- [21] K. Kyuma, et al., "Fiber Optic Current and Voltage Sensors Using A Bi₁₂GeO₂₀ Single Crystal," J. Lightwave Technology, vol. LT-1, no. 1, 1983.
- [22] T. Yoshino, "Optical Fiber Sensors for Electric Industry," SPIE, vol. 798, Fiber Optic Sensor II, 1987.
- [23] G.W. Day, et al., "Optical Power Line Voltage and Current Measurement System," EPRI EL-5431, vol. 1, Sep. 1987.
- [24] G.W. Day, et al., "Optical Power Line Voltage and Current Measurement System," EPRI EL-5431, vol. 2, Sep. 1987.
- [25] 石黑浩三 外, 結晶光學, 鬱北 出版株式會社, 1975.
- [26] K. Kyuma, et al., "Fiber Optic Measuring System for Electric Current by Using a Magneto optic Sensor," IEEE J. of Quan. Elec. vol. QE-18, no. 10, Oct. 1982.
- [27] Joseph C. Palais, "Fiber Optic Communication," 2nd Ed., Prentics-Hall International Editions, 1988.

 著 者 紹 介

金 堯 喜 (正會員) 第25卷 第10號 參照
 현재 한국전기연구소 전력전
 자 연구부장

李 大 寧 (正會員) 第27卷 第5號 參照
 현재 경희대학교 전자공학과
 교수 및 산업정보대학원 원
 장