

BSO와 ZnSe의 전기/자기광학효과를 이용한 광 전압 및 전류센서

(Optical Voltage and Current Sensor Using Electrooptic and
Magneto optic Effects of BSO and ZnSe Crystals)

朴曙延*, 鄭遇氣*, 權元鉉*, 崔平錫**, 朴漢奎*

(Seo Yeon Park, Woo Gee Chung, Won Hyun Kwon,
Pyung Suk Choi and Han Kyu Park)

要 約

본 논문에서는 광섬유 전송로형 센서모델에 근거하여 전기/자기 광학 효과를 이용한 전압 및 전류 측정 시스템을 유전율 텐서에 의해 이론적으로 해석하고 실험하였다.

실험결과 BSO를 이용한 광전압 센서는 500V까지의 인가전압에 대해 2% 이하의 오차와 1,000V에서 최대 4.93%의 오차를 보였고 ZnSe를 이용한 광 전류 센서는 실효전류 1,000A까지에 대해 최대 4%의 오차를 보였다. 온도 특성은 $-5^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화에 대해 전압센서 및 전류센서 각각 $\pm 1.8\%$, $\pm 2.73\%$ 로 계산되었다.

Abstract

In this paper, voltage and current measurement systems which utilize linear electrooptic and magneto optic effects of BSO and ZnSe crystals are theoretically analyzed and experimented.

In experiments, BSO voltage sensor has maximum 2% error within the applied voltage of 500V, and ZnSe current sensor has maximum 4% error within 1,000 A range.

And temperature dependences of sensitivity for voltage and current in the temperature range from -5°C to 60°C are measured $+1.8\%$ and 2.73% , respectively.

I. 서 론

지금까지 전력계통에 사용되어온 전자계 측정 센서

는 철심을 사용한 전자기적 결합방식으로 절연 강화 대책, 중량, 고가 등이 문제시 되어 왔다.¹⁾ 최근에 고절연성, 유도잡음면역성, 소형 등의 장점을 갖는 광 기술을 응용한 전압 및 전류측정용 센서의 구성이 활발히 진행되고 있다.^{1~4)}

광섬유를 이용한 센서로는 크게 광섬유 기능형과 광섬유 전송로형으로 분류할 수 있는데 광섬유 기능형은 광섬유 자체의 복굴절과 자기광학 효과를 이용

*正會員, 延世大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

**正會員, 昌原大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Changwon Univ.)

接受日字: 1989年 1月 27日

하여 전류를 측정하나 광섬유 제조과정상의 문제와 외부 환경에 의한 문제로 편광상태가 불확실하여 실질적인 응용이 어렵다.^[1,2] 이와 같은 문제를 해결하기 위해 광섬유는 전송로로만 이용하고 센싱부로는 복굴절 결정을 이용하는 광섬유 전송로형이 일반화되고 있다.^[4]

본 연구에서는 광섬유 전송로형을 채택하여 BSO와 ZnSe 결정의 복굴절 현상을 섭동에 의한 유전율 텐서량의 변화로 분석하고 결합모드방정식에 적용하여 BSO를 이용한 전압센서와 ZnSe를 이용한 전류센서의 원리를 해석하고 실험하였다.

II. 복굴절 결정에서의 빛의 전파

직선 편광된 빛이 결정체에 입사되면 결정체를 통과한 빛은 선형 복굴절(linear birefringence)이나 원형 복굴절(circular birefringence) 혹은 선형 및 원형 복굴절을 받으므로 빛의 편광상태가 변한다.

복굴절 현상은 유전율 텐서를 이용하여 분석함으로써 자세히 설명된다. 선형 복굴절만을 갖는 균질의 비흡수성 결정의 경우 자기 감수율은 0으로 근사할 수 있으나 전기 감수율은 분극도 P가 결정 격자와 연관된 인가전장 E의 방향 및 크기에 의존하므로 텐서량이 된다.

섭동이 없는 결정에서 빛의 전파는 일정한 크기를 갖고 전파하는 직교모드의 선형 결합으로 간주할 수 있으나 광활성량인 내부섭동(internal perturbation)과 전장이나 자장과 같은 외부섭동(external perturbation)을 받으면 더 이상 전파의 고유벡터를 가질 수 없다.

섭동을 받는 결정의 유전율 텐서를

$$\epsilon'_{ij} = \epsilon_{ij} + \Delta\epsilon_{ij} \quad (1)$$

로 표현할 때 ϵ_{ij} 는 섭동이 없는 경우의 유전율이고 $\Delta\epsilon_{ij}$ 는 섭동에 의한 유전율 변화량이다. 따라서 유전율 변화량을 알면 섭동하에서 전파되는 빛의 직교모드를 구할 수 있다.

결정에서 섭동을 받지 않은 빛이 z축으로 전파되는 경우 전송모드는 일정한 크기를 가지면서 직교하므로 모드간의 선형 결합에 의해 식(2)와 같이 파동의 전파를 나타낼 수 있다.^[5]

$$\vec{E} = A_1 \vec{e}_1 e^{i(\omega t - k_1 z)} + A_2 \vec{e}_2 e^{i(\omega t - k_2 z)} \quad (2)$$

여기서 \vec{e}_1, \vec{e}_2 는 직교모드인 전장벡터의 편광 방향을 나타내는 벡터이고 $k_1 = \omega n_1 / c, k_2 = \omega n_2 / c$ 는 이에 대응하는 파수이고 A_1, A_2 는 직교모드의 크기를 나

타내는 상수이다.

그러나 섭동시에는 유전율 텐서의 변화로 $\vec{e}_1 \exp[i(\omega t - k_1 z)]$ 와 $\vec{e}_2 \exp[i(\omega t - k_2 z)]$ 가 직교성을 갖지 못하므로 전송모드의 크기가 상수가 아니다. 따라서 내부 섭동시의 파동의 전파는

$$\vec{E}(z, t) = A_1(z) \vec{e}_1 e^{i(\omega t - k_1 z)} + A_2(z) \vec{e}_2 e^{i(\omega t - k_2 z)} \quad (3)$$

로 나타내며 여기서 모드의 크기가 z의 함수이므로 파동방정식을 이용하여 모드의 크기에 대한 미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -\frac{i\omega^2 \mu}{k_1} [\Delta\epsilon_{11} A_1(z) + \Delta\epsilon_{12} A_2(z) e^{-i(k_2 - k_1)z}]$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -\frac{i\omega^2 \mu}{k_2} [\Delta\epsilon_{21} A_1(z) e^{i(k_2 - k_1)z} + \Delta\epsilon_{22} A_2(z)] \quad (4)$$

$$A_1(z) = e^{-i\rho_0 z/2} \left[A_1(0) \left(\cos \frac{\delta}{2} z + i \frac{\rho_0}{\delta} \sin \frac{\delta}{2} z \right) - \frac{\omega}{c} \frac{G}{n_1 \delta} A_2(0) \sin \frac{\delta}{2} z \right]$$

$$A_2(z) = \rho_0 e^{i\rho_0 z/2} \left[\frac{\omega}{c} \frac{G}{n_2 \delta} A_1(0) \sin \frac{\delta}{2} z + A_2(0) \left(\cos \frac{\delta}{2} z - i \frac{\rho_0}{\delta} \sin \frac{\delta}{2} z \right) \right]$$

$$\rho_0 = k_2 - k_1 = \frac{\omega}{c} (n_2 - n_1)$$

$$\delta = \sqrt{\rho_0^2 + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \frac{G^2}{n_1 n_2}} \quad (5)$$

여기서 ρ_0 는 결정 자체의 굴절을 차에 의한 선형 복굴절량이고 δ 는 선형 및 원형 복굴절에 의한 위상 지연량으로 결국 섭동량의 변화가 두 모드간의 에너지 교환을 일으킴을 보여준다.

이때 전파되는 빛의 직교모드는 항상 유일한 편광 특성 및 전파상수를 가져야 하므로 직교모드를 식(6)으로 놓으면

$$\vec{E} \equiv \vec{e} e^{-ik'z}, \quad k' = \frac{\omega}{c} n' \quad (6)$$

선형 및 원형 복굴절을 갖는 결정을 전파하는 빛의 직교모드에 대한 굴절지수를 구할 수 있다.

$$n'_1, n'_2 = \frac{n_1 + n_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{n_2 - n_1}{2} \right)^2 + \frac{G^2}{4n_1 n_2}} \quad (7)$$

이와 같이 복굴절은 결정이 지니고 있는 고유의 유전율 텐서량이나 내부 섭동량인 유전율 텐서량에 의해 결정내에서 자연적으로 일어나는 현상이다. 이제 전장이나 자장과 같은 외부 섭동에 의해 유전율 텐서

량을 변화시켜 복굴절을 인위적으로 발생시키는 전기 및 자기광학 효과에 대하여 알아보자.

전기 광학 효과는 외부의 전장에 의한 전하의 재분포 현상에 의하여 전자나 이온과 같은 전하량을 갖는 분자를 묶고 있는 내부 원자의 전장에 대한 외부 전장의 비에 의해 결정된다.

외부의 인가 전장이 가해진 결정내에서 빛의 전파는 역유전율 텐서(dielectric impermeability tensor)의 개념을 도입하여 설명할 수 있다.

$$\eta_{ij} = \epsilon_0 (\epsilon^{-1})_{ij} \quad (8)$$

전장하에서의 역유전율 텐서와 전장이 없을 때의 역유전율 텐서의 차이가 식(9)로 표현된다.

$$\eta_{ij}(\vec{E}) - \eta_{ij}(0) = r_{ijk} E_k + s_{ijkl} E_k E_l \quad (9)$$

여기서 \vec{E} 는 인가 전장이고 r_{ijk} 는 선형(pockels) 전기광학계수, s_{ijkl} 은 이차(kerr) 전기광학계수이며 이차 이상의 고차 효과는 너무 적어 무시된다. 일반적으로 외부에서 가해주는 인가 전장에 비해 내부 원자 전장이 상대적으로 매우 크므로 선형 전기 광학 효과가 존재할 때 이차 효과는 무시할 수 있다. 그러나 중앙 대칭 점군(centrosymmetric point group)의 결정은 $r_{ijk}=0$ 이므로 선형 전기 광학 효과가 사라지고 이차 효과가 주요 현상으로 나타난다. 여기서는 Pockels 효과를 갖는 결정을 다루기로 한다.

결정내의 전장 에너지 밀도는 일정한 곡면군을 가지므로 식(10)의 굴절을 타원체로 나타낼 수 있고

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (10)$$

외부의 인가 전장에 의한 굴절을 변화로 인해 새로운 굴절을 타원체가 형성된다.

$$\frac{x^2}{n_x'^2} + \frac{y^2}{n_y'^2} + \frac{z^2}{n_z'^2} = 1 \quad (11)$$

등방성 유전체에 빛의 진행 방향과 동일하게 자장이 인가되면 입사되는 직선 편광된 빛이 출력측에 회전되어 나타난다. 즉 자장에 의한 광활성인 인위적인 원형 불굴절이 발생하므로 출력측에서의 편광면의 회전량은 자장의 세기(H)에 비례한다.

$$\theta_H \ell = V_e H \ell \quad (12)$$

여기서 ℓ 은 자장의 영향을 받는 결정의 길이이고, V_e 는 상수로서 단위 자계 및 단위 길이당 회전량이며 각 물질에 따라 다르다.

외부 자장에 의한 자기 광학 효과는 선형 전기 광학 효과인 Pockels 효과에 대응하는 파라데이 효과

와 이차 전기 광학 효과인 Kerr 효과에 대응하는 Cotton-Mouton 효과가 있으며 여기서는 전기 광학 효과에서와 마찬가지로 파라데이 효과가 존재하는 결정을 사용함으로써 이차 효과를 무시한다.

III. BSO와 ZnSe를 이용한 광 PT / CT

BSO의 Pockels 효과를 이용한 전압 센서의 구성도는 그림 1 과 같다.

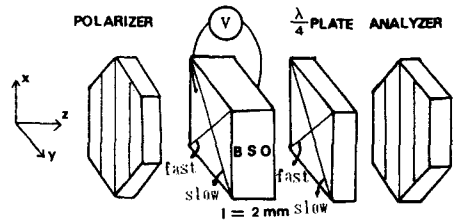


그림 1. 전압 측정 시스템
Fig. 1. Voltage measuring system.

BSO 결정은 입방 정계(cubic crystal system)중에서 점군(point group)이 23인 등방성 결정이므로 선형 복굴절이 없다. 그러나 광활성이 있어 원형 복굴절이 존재하므로 외부 섭동이 없을 때 z축으로 진행하는 직선 편광된 빛에 대한 유전율 텐서량은 BSO의 결정 구조와 광활성량에 의한 섭동량의 중첩으로 나타난다.

$$\epsilon'_{ij} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} n_o^2 & 0 \\ 0 & n_o^2 \end{pmatrix} + \epsilon_0 \begin{pmatrix} 0 & iG \\ -iG_0 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$G_0 = \frac{\lambda}{\pi} n_o \theta_0$$

여기서 λ 는 이용되는 광원의 파장이고 n_o 와 θ_0 는 그 파장에 대한 BSO의 굴절지수와 광활성량이다.

주축 변환을 이용하여 전장하에서의 굴절 지수를 구하면⁶⁾

$$\begin{aligned} n_x &= n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{41} E_z \\ n_y &= n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{41} E_z \\ n_z &= n_o \end{aligned} \quad (14)$$

이므로 이 값을 식(13)에 대입하면 외부 섭동에 해당하는 전장하에서의 유전율 텐서가 새로이 형성된다.

$$\epsilon'_{ij} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} n_o^2(1 - n_o^2 r_{41} E_z) & i \frac{\lambda}{\pi} n_o \theta_o \\ -i \frac{\lambda}{\pi} n_o \theta_o & n_o^2(1 + n_o^2 r_{41} E_z) \end{pmatrix} \quad (15)$$

식(15)를 파동 방정식과 결합 모드 방정식에 적용하여 외부 전장하에서 BSO 결정내에 전파되는 빛의 직교 모드에 대한 굴절지수를 구한다.

$$n'_1, n'_2 = \frac{n_x + n_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{n_y - n_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{c}{\omega}\right)^2 \frac{n_o^2 \theta_o^2}{n_x n_y}} \quad (16)$$

길이가 ℓ 인 BSO 결정을 통과한 빛의 두 모드간의 위상차는 식(17)과 같다.

$$\Delta = \delta \ell = -\sqrt{(\rho_E \ell)^2 + (2\theta_o \ell)^2}$$

$$\delta = \frac{\omega}{c} (n'_2 - n'_1) = -\sqrt{\rho_E^2 + (2\theta_o)^2}$$

$$\rho_E = \frac{\omega}{c} (n_y - n_x) = \frac{\omega}{c} n_o^3 r_{41} E_z$$

$$n_x n_y \approx n_o^2 \quad (17)$$

센서부에서의 광 강도 변조를 알기 위해 편광자(polarizer)와 검광자(analyzer)의 편광 방향을 일치시키고 검광자의 편광 방향과 평행한 방향의 빛의 성분을 E_{\parallel} 라고 하면 BSO 결정의 결합 모드 방정식으로 부터 구한 위상 지연 특성을 이용하여 그림 1의 전압 측정 시스템을 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{\parallel} \\ E_{\perp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\pi/4} 0 \\ 0 e^{i\pi/4} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \cos \frac{\Delta}{2} - i \frac{\rho_E}{\delta} \sin \frac{\Delta}{2} & -\frac{2\theta_o}{\delta} \sin \frac{\Delta}{2} \\ \frac{2\theta_o}{\delta} \sin \frac{\Delta}{2} & \cos \frac{\Delta}{2} + \frac{\rho_E}{\delta} \sin \frac{\Delta}{2} \end{pmatrix} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} E_{in} \quad (18)$$

따라서 출력단에서의 최종 출력 광 강도는 식(19)와 같다.

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} \left(1 + \frac{\pi V}{V_{\pi}} \frac{\sin \sqrt{\left(\frac{\pi V}{V_{\pi}}\right)^2 + (2\theta_o \ell)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\pi V}{V_{\pi}}\right)^2 + (2\theta_o \ell)^2}} \right), \quad (19)$$

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{41}} \quad (19)$$

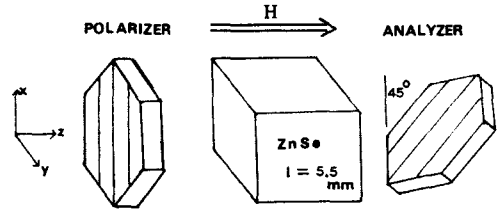


그림 2. 전류 측정 시스템
Fig. 2. Current measuring system.

ZnSe의 파라데이 효과를 이용한 전류 센서의 구성도는 그림 2와 같다.

ZnSe는 입방 정계중 점군이 $\bar{4}3m$ 인 등방성 결정으로 선형 및 원형 복굴절이 없으나 ZnSe 결정의 z축 방향으로 직선 편광된 빛을 입사시키고 빛의 진행 방향과 동일하게 외부 섭동인 자장을 가하면 ZnSe의 유전율은 외부 자장에 의한 gyration 섭동이 나타나므로 유전율 섭동은 ZnSe 결정 자체의 섭동량과 파라데이 효과에 의한 섭동량의 중첩으로 나타난다.

$$\epsilon'_{ij} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} n_o^2 & 0 \\ 0 & n_o^2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \epsilon_0 \begin{pmatrix} 0 & iG_H \\ -iG_H & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$G_H = \frac{\lambda}{\pi} n_o \theta_H$$

여기서 파라데이 효과에 의한 편광면의 회전량(θ_H)이 광회절량(θ_o)에 해당하므로 식(13)의 G_o 대신 G_H 가 인위적인 원형 복굴절을 야기시킨다. 따라서 길이 ℓ 인 ZnSe 결정이 자장의 영향을 받으면 전파되는 빛의 위상차는 자장의 세기에 의해 결정된다.

$$\Delta = -2V_e H \ell \quad (21)$$

센서부의 광 강도 변조를 알기 위해 검광자의 편광 방향과 평행한 방향의 빛의 성분을 E_{\parallel} 라고 하고 검광자의 방향을 편광자에 대해 45° 기울이면 50%의 광 강도 전송이 가능하다. 그림 2의 전류 측정 시스템은 식(22)의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{\parallel} \\ E_{\perp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Delta}{2} & -\sin \frac{\Delta}{2} \\ \sin \frac{\Delta}{2} & \cos \frac{\Delta}{2} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} E_{in} \quad (22)$$

식(22)로 부터 입출력 광 강도의 관계는 식(23)이 된다.

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} (1 + 2V_e H \ell) \quad (23)$$

IV. 실험 및 결과 고찰

그림 3에 송수광부와 센서부 및 두 부분을 연결하는 다중 모드 광섬유가 포함된 전체 시스템 구성도를 나타내었다. 실험에서 사용된 광원은 파장이 0.87 μm 인 AlGaAs LED(Seiko사의SMD-20E)이다. 광섬유(Seiko사의 SA-2J)를 통해 전송되는 LED의 출력은 랜덤하게 편광된 빛으로 SELFOC마이크로 렌즈(SML)를 통과시켜 평행광으로 만든다. SML(06LGT114)에 의해 형성된 평행광은 각 시스템의 편광자를 통과함으로써 직선 편광된 빛이된다. 이용된 편광자는 PBS(polarizing beamsplitter)로써 그림3에서 SML1을 통과한 빛은 랜덤한 상태이므로 PBS1의 특성 때문에 x축 방향으로 편광된 빛이 y축으로 입사될 경우 x축 방향으로 편광되어 z축으로 진행되는 빛의 양과 x축 방향으로 편광되어 y축 방향으로 편광되어 y축으로 진행되는 빛의 양이 같다. 실험에서는 전류측정시 센서에 철심을 씌워 자계 강도를 높일 수 있도록 전자를 사용하였는데 이 빛이 센싱부를 지나면서 광활성이 외부장의 영향에 의해 빛의 편광상태가 변하므로 일정한 방향으로 놓인 검광자를 통과하는 빛의 양은 외부에서 가한 전장이나 자장의 세기에 따라 변한다. 검광자도 일종의 편광자로서 PBS를 이용하였고 검광자를 통과한 빛은 SLM2로 집광시켜 광섬유로 전송시킨 후 Si PIN-PD(Seiko사의 SMD-20P)로 수광하였다. 검광자를 통과한 빛은 일정한 입력광이 외부장의 크기와 주파수에 의해 변한 형태이므로 입력광에 해당하는 D.C. 성분을 제거하고 외부장에 의한 변화량인 A.C. 성분만을 증폭한다.

센싱부에 빛의 진행 방향으로 ITO 투명 전극이 입혀진 길이 2mm의 BSO 결정과 1/4 파장판이 들어있는 전압 센서의 경우, 파장이 0.87 μm 인 광원에 대해 광활성량은 10.5deg/mm이고 중형 전기 광학 변조 방식을 이용했으므로 반파장 전압은 6800V이다.

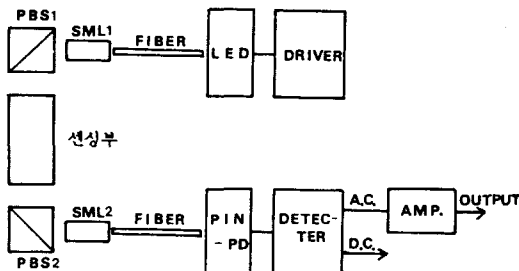


그림 3. 전체 시스템 구성도
Fig. 3. Block diagram of total system.

전압원으로는 상용 주파수 60Hz에서 실효 전압을 0에서 1,000V까지 공급할 수 있는 Yokogawa사의 YEW-2558을 사용하였다. 이 때 입력 실효 전압에 대한 신호 처리단의 출력 관계는 그림 4와 같다.

실험 결과 실효 전압 500V까지는 2%이하의 오차를 보이면서 우수한 직선성을 가지나 전압 증가에 따라 오차가 커져 실효 전압 1,000V에서 4.9%의 최대 오차가 발생했다. 이는 전압 센서의 입출력 광 강도의 관계에서 $\sin x/x$ 의 부분이 전압의 증가에 따라 감소되기 때문이다.

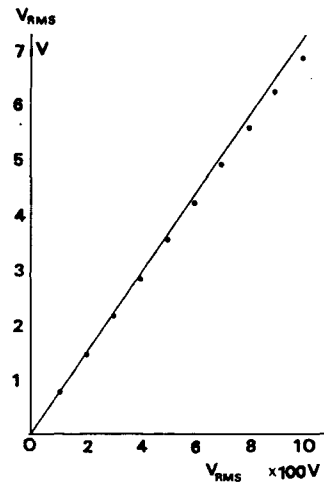


그림 4. BSO를 이용한 전압 센서의 직선성
Fig. 4. Linearity of voltage sensor using BSO crystal.

전압 센서의 온도 특성은 BSO 결정의 파장에 따른 광활성량과 반파장 전압의 온도의존성에 의해 결정되므로 계산할 수 있다. 실험적으로 계산된 BSO 결정의 광활성에 대한 온도 계수는 $-2.9 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 이고 반파장 전압의 온도 계수는 $3.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 이므로 60°C의 온도 변화를 받는 길이 2mm의 BSO를 이용한 전압 센서의 온도 특성은 $\pm 1.8\%$ 이다.⁴⁾

센싱부로 길이가 5.5mm이고 Verdet 정수가 0.15min/Oe·cm인 ZnSe 결정이 이용된 전류 센서의 실험에서는 편광자와 검광자의 편광 방향이 45°의 차이가 나도록 PBS2의 방향을 조정한 후 그림 5와 같이 실효 전류 1,000A까지 공급할 수 있는 구리 도선에 갯부의 길이를 2.5cm로 제작한 링 코어형 철심을 설치한 후 갯부에 센서부를 삽입하였다.

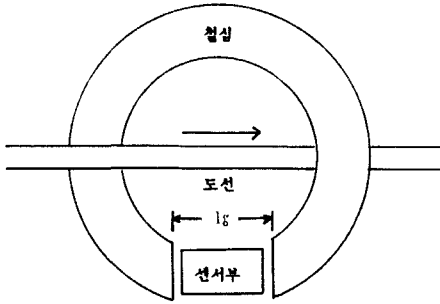


그림 5. 도선상에서의 전류 측정
 Fig. 5. Current measurement on the power line.

도선에 흐르는 실효 전류의 단위는 [A]이고 시스템에서 이용되는 단위는 [Oe]이므로 단위 변환을 하면 꺾부에서의 자계는 식(24)과 같다.

$$H_{g,Peak} = \frac{4\pi\sqrt{2}}{l_g} \times 10^{-3} I_{rms} \quad (24)$$

철심을 사용한 상태에서 도선에 흐르는 실효 전류와 광 신호 처리부의 출력 전압과의 관계는 그림 6과 같다.

ZnSe 결정의 Verdet 정수의 온도 의존성은 $3.75 \times 10^{-5} \text{min/Oe} \cdot \text{cm} \cdot \text{C}$ 이므로 온도 변화 60°C 에 대해 전류 센서의 온도 특성은 $\pm 2.73\%$ 이다.

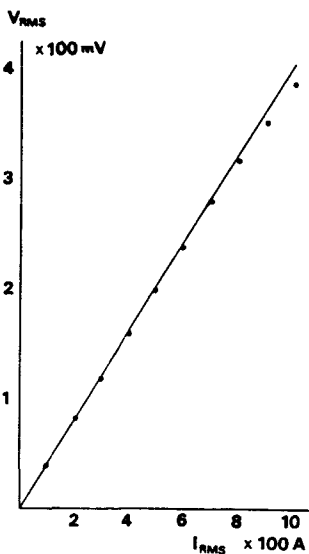


그림 6. ZnSe를 이용한 전류 센서의 직선성
 Fig. 6. Linearity of current sensor using ZnSe crystal.

전류 센서의 경우 철심을 사용함으로써 자계 강도의 증가뿐 아니라 도선을 흐르는 실효 전류 1,000A 까지에 대해 4%이하의 오차를 갖는 우수한 직선성을 보였다.

V. 결 론

본 연구에서는 등방성 결정인 BSO와 ZnSe 결정의 전기/자기 광학 효과를 이용하여 전압 및 전류 측정 시스템을 구성하고 실험하였다.

실험에 앞서 BSO와 ZnSe 결정의 유전율 텐서량을 섭동에 의해 분석하고 결합 모드 방정식으로 외부장에 의한 빛의 직교 모드의 굴절지수를 구하여 각 시스템에 적용하였다.

이와 같은 이론적 분석을 토대로 광 전압 센서, 광 전류 센서를 구성한 후 실험하였다.

실험 결과, 광섬유 기능형에 비해 광 손실이 거의 없고 외부 환경에 영향을 받지 않으므로 실용성의 증대를 가능하게 하였으며 BSO를 이용한 전압 센서는 광섬유로는 힘든 전압 측정이 가능하였다. 일반적으로 전류를 측정하는 실험의 경우 저전류에서 자계 강도를 높이기 위해 솔레노이드를 이용하였으나 본 실험에서는 실효 전류 1,000A까지의 고전류를 공급할 수 있는 도선을 직접 이용하여 ZnSe를 파라데이 소자로 이용한 전류 센서로 실험함으로써 실용성을 높였고 우수한 직선성 및 온도 특성을 얻을 수 있었다. 이러한 결정 광학을 이용한 전력 계측용 광 PT (potential transformer)/CT (current transformer)는 광변성기의 특징인 소형 및 비접촉 방식에 따른 고절연성, 무유도성, 보수용이, 비용절감, 신뢰도 증가 등을 제공하므로 전력 계통의 계측 및 제어 시스템에 유용하리라 기대된다.

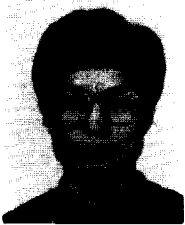
參 考 文 獻

- [1] T.G. Giallorenzi, "Optical fiber sensor Technology," *IEEE Trans. on Microwave Tech.*, vol. MTT-30, no. 4, p. 472, April 1982.
- [2] R. Ulrich, A. Simon, "Polarization optics of twisted single mode optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 3, p. 2241, 1979.
- [3] K. Kyuma, et al., "Fiberoptic current and voltage sensors using a Bi₁₂GeO₂₀ single crystal," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-1, no. 1, p. 93, 1983.

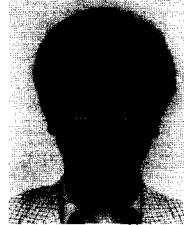
[4] T. Mitski, et al., 'Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic field sensors,' *IEEE SM442-8*, 1986.
 [5] Yariv and Yeh, *Optical Waves in Crystals*,

Wiley-Interscience Publication, 1984.
 [6] A. Yariv, *Quantum Electronics*, CBS College Publishing, New York, 1985. *

著者紹介



朴 暉 延(正會員)
 1966年 3月 16日生. 1987年 연세대학교 전자공학과 졸업. 1989년 동대학원 전자공학과 석사학위 취득. 1989년~현재 한국전자통신연구소 기초기술연구부 연구원. 주관심분야는 광센서, 광정보처리, 광컴퓨팅 등임.



崔 平 錫(正會員)
 1951年 7月 31日生. 1978年 2月 성균관대학교 전자공학과 졸업. 1980年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1985年 2月 연세대학교 전자공학과 공학박사학위 취득. 1986年 3月~현재 창원대학 전자공학과 조교수. 주관심분야는 광정보처리, 광컴퓨팅, 광센서 등임.



鄭 遇 氣(正會員)
 1963年 11月 14日生. 1986年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업. 1988年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업 공학석사학위 취득. 주관심분야는 광센서, 광정보처리, 광통신 등임.

朴 漢 奎 (正會員) 第25卷 8號 參照
 현재 연세대학교 전자공학과 교수



權 元 鉉(正會員)
 1962年 8月 10日生. 1983年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업 공학사학위 취득. 1985年 2月 연세대학교 대학원 졸업 공학석사학위 취득. 1986年 2月~현재 연세대학교 대학원 박사과정. 주관심분야는 광계측, 광신호처리, 광컴퓨팅 등임.