

論文 90-27-11-16

EOM-BSO 소자를 이용한 광전압센서에 관한 연구

(A Study on the Fiber-Optic Voltage Sensor
Using EMO-BSO)

金堯喜*, 李大寧**

(Yo Hee Kim and Dai Young Lee)

要 約

전기광학 소자인 비스무스 실리콘 옥사이드($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$: 이하 BSO라 칭함)와 편광자(polarizer), 1/4 파장판(1/4 waveplate), 검광자(analyzer)와 결합하여 광변조기를 만들고 이를 전압센서로 이용할 수 있도록 전기광학 측정 시스템을 구성하고 그 특성을 실험하였다. 송수신부인 E/O 변환기 및 O/E 변환기는 LED와 PIN-PD로 구성하여 구동되며 전송로는 코아/클래드경이 100/140 μm 인 멀티모드 광파이버를 사용하였다. 센서부와 광파이버 사이에는 셀폭 마이크로렌즈로서 결합하였다. 실험에 앞서 맥스웰 방정식과 파동방정식을 이용하여 BSO 단결정 내부에서 일어나는 광파의 전파특성에 관한 행렬식을 구하였고 센서가 갖는 광강도 변조식을 유도하였다. 실험 결과로부터 제작된 BSO 전압 센서는 교류전압 50V~800V(60Hz)에서 $\pm 2.5\%$ 의 측정오차를 보였다. 인가전압의 증가에 따라 출력의 포화값이 커지는데 이러한 현상은 광강도 변조식에서 센서의 선광성에 기인한다는 것을 확인할 수 있었다. 센서의 온도특성 실험결과 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 에서 변화율은 $\pm 0.6\%$ 이하로 측정되었다. 주파수 특성실험 결과 DC~100KHz까지 양호한 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper describes fiber optic voltage sensor using EOM-BSO (Electro-Optic Modulator-Bismuth Silicon Oxide). Transceiver has an electrical/optical converter and an optical/electrical converter which consist of light emitting diode, PIN-PD, and electronic circuits. Multimode fiber cable of 100/140 μm core/clad diameter is used for connecting the transceiver to fiber optic voltage sensor. And selfoc micro lenses are used for coupling multimode fiber cable and fiber optic voltage sensor. Before our experiments, by applying the Maxwell equations and wave equations, We derive matrix equation on wave propagation in the BSO single crystal. And also we derive optimal equation on intensity modulation arising through an analyzer. According to experimental results, fiber optic voltage sensor has maximum 2.5% error within the applied AC voltage of 800V. As the applied voltage increases, saturation values of voltage sensor also increase.

This phenomenon is caused by optical rotatory power of BSO single crystal. And temperature dependence of sensitivity for fiber optic voltage sensor in the temperature range from -20°C to 60°C are measured within $\pm 0.6\%$. And frequency characteristics of the voltage sensor has good frequency characteristics from DC to 100kHz.

*正會員, 韓國電氣研究所
(Korea Electrotechnology Research Institute)
接受日字: 1990年 7月 23日

**正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)

I. 서 론

최근 광파이버 기술의 발전에 따라 광파이버 센서에 대한 관심이 고조되고 있다.^[1,2] 광파이버 센서 기술은 광의 다양한 파라메타 즉 「진폭, 파장, 위상, 편파면」들과 「반사, 흡수, 굴절, 분산, 산란, 간섭, 회절」등의 여러 현상과 효과들을 복합하는 기술로서 실제로 주변환경상황에 강한 효용성 있는 센서를 구성하는데에는 어려움이 많다. 기존의 전압계측 방법은 고조파공진에 의한 정도 저하등이 문제시 되고 있으므로 앞으로 광범위한 전력계통의 감시, 제어, 보호 기능 등을 고도화하기 위해서는 기존의 계측 방법을 새로운 방식으로 바꿀 필요가 있다.^[6,5] 광이 기본적으로 갖고 있는 전기절연성, 안전성, 소경량성, 병렬처리성, 비접촉성, 고감도성을 전기설비에 활용할 수 있으므로 효율성은 더욱 증대될 것이다. 최근 이러한 장점을 가질 수 있는 광학 소자 센서를 개발하여 전압 뿐만 아니라 고전계측정 등에 사용하고자 활발한 연구가 진행중이다.^[6,7] 광학소자를 사용하여 전압을 계측하는 원리로서는 pockels 및 kerr 효과 등을 이용할 수 있지만 여기서는 전계의 1차에 비례하는 pockels 효과를 이용하였다. Pockels 효과 계수가 큰 광학소자에 전압을 직접 인가하는 방법과 소자를 전계중에 배치하여 전압으로 환산하여 검출하는 방법 등이 연구되어 왔다.^[8,9] 전기 광학소자는 APD, KDP, LiNbO₃, LiTaO₃, BGO 등이 이용되고 광원부는 He-Ne 레이저가 주로 사용되어 왔으나 이러한 센서와 소자들은 온도특성이 문제가 되고 실용적인 시스템 구성면에서 어려움이 있다.^[8,10,11,12] 따라서 본 논문에서는 센서로서 온도특성이 우수한 BSO 소자를 사용하고, 광원이나 수광소자는 모듈화가 쉬운 반도체 소자를 이용하여 시스템을 구성하여 이를 이론적으로 해석하고^[13] 실험을 행하였다. 센서구성은 BGO와 같은 계열인 bcc-23군에 속하는 단결정체인 BSO와 1/4파장판, 편광자, 검광자를 결합하고 전송로는 다중모드 광파이버를 이용하여 구성하였다. 그리고 센서로서의 기능을 위해 교류전압을 공급했을때 센서가 갖고 있는 직선성, 온도특성, 주파수 특성을 조사하고 전압센서의 개발 내용에 대하여 기술하였다.

II. 전기광학효과와 광강도 변조

전기광학 효과가 있는 BSO를 전계중에 놓고 그림 1과 같은 구조에 빛을 입사시키면 편광자(polarizer)에서는 직선편광이 되고 1/4파장판(wave plate)에서는 직교성분에 의한 굴절을 차이에 의해 $\pi/2$ 만큼 위상차가 생겨 원형편광이 된다. BSO 출력은 주어진

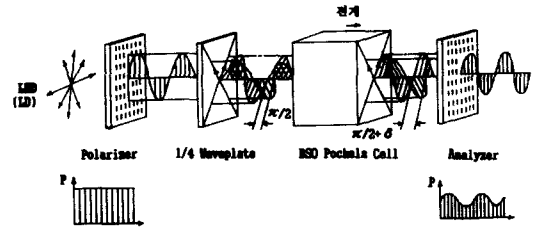


그림 1. 센서에서의 광강도 변조 상태
Fig. 1. Optical intensity modulation in sensor part.

전계에 의해 δ 만큼 위상차가 더 생겨 타원 편광이 되고 검광자(analyzer)를 통하여 광강도 변조되고 이때 센서 내부의 편광상태는 그림 2와 같이 나타내어진다.

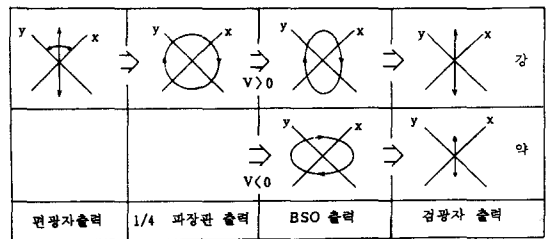


그림 2. 센서부에서의 광의 편광상태
Fig. 2. Variations of polarization states in sensor part.

굴절률의 변화가 전계의 1승에 비례하는 현상을 pockels 효과라 하고 대표적인 결정으로서 수정, BSO, BGO, LiNbO₃, 등이 있지만 여기서는 온도특성이 우수한 BSO를 사용하였고 광학소자와 결합하여 전기광학 효과에 대해 고찰하였다. BSO 단결정은 산화비스무스와 산화규소 등과 같이 점군 23에 속하는 결정으로서 아직까지 완전한 표준구조는 알려지고 있지 않으나 입방정계의 구조를 하고 있으며 BGO (Bi₁₂GeO₂₀)와 유사한 특성을 갖고 있는 것으로 알려지고 있으며 기본적인 물리적특성은 표1에 나타내었다.

편광응용소자로서 BSO의 특성은 현저한 전기광학 효과를 가지고 있으면서 선광성도 보유하고 있기 때문에 유전율 텐서는 다음 식(1)로 표현할 수 있다.^[13]

표 1. BSO 단결정의 물리적 특성
Table 1. Electro-optic properties of BSO single crystal.

분자식	Bi ₁₂ SiO ₂₀
점군	23
공간군	I23
결정계	체심입방
격자상수	a=10.103 Å
단위세포당 격자점수	2
채우기 비율	0.680
Melting temperature	895±5°C
결정형태	23 (body centered cubic)
굴절률 (n _o)	2.45 (λ=0.87μm)
유전율 (ε)	56 (100KHz)
압저항율 (ℓ)	10 ¹⁵ Qm
전기 광학 계수 (γ ₄₁)	4.35×10 ⁻¹²
선광성	10.5°/mm (λ=0.87μm)
밀도	9.2g/cm ³

$$D = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \gamma_{41} & 0 \\ -\gamma_{41} & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} E \quad (1)$$

여기서 $\epsilon_x = \epsilon - \eta$, $\epsilon_y = \epsilon + \eta$
 $\eta = \epsilon_0 n_0^3 \gamma_{41} E_1$, $\gamma_{41} = (2\theta/\omega) (\epsilon/\mu)^{1/2}$
 ϵ_0 : 진공의 유전율
 γ_{41} : 전기광학 정수
 θ : 선광성
 E_1 : BSO의 Z방향의 전계
 n_0 : 굴절율

그림 1에서 평면파 $E = E_0 \exp[j(\omega t - Kz)]$ 가 진행하고 있는 동일방향에 전계 E가 인가되었다고 하면 (1)식은 maxwell 방정식^[14]

$$B = \mu H$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

과

$$\nabla \times \nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times B$$

$$= -\mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3)$$

및 연산자 관계식

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \quad (4)$$

에 의하여 식(5)가 구해진다.

$$\nabla^2 E - \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

식(1)~식(5)를 이용하면 BSO 내에서의 광파의 전파상태를 나타내는 고유방정식 식(6)이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x - K^2/\omega^2 \mu & j\gamma \\ -j\gamma & \epsilon_y - K^2/\omega^2 \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

위 식의 해가 존재하는 조건으로써 K의 고유치가 구하여져 BSO 결정중에는 다음 식(7)로 표현되는 2개의 전파 모드가 존재함을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = A' \begin{bmatrix} 1 \\ -j/\alpha \end{bmatrix} \exp[j(\omega t - K_+ z)]$$

$$\begin{bmatrix} E_x'' \\ E_y'' \end{bmatrix} = A'' \begin{bmatrix} 1 \\ j\alpha \end{bmatrix} \exp[j(\omega t - K_- z)] \quad (7)$$

여기서 $(K_{\pm})^2 = \omega^2 \mu (\epsilon \pm \sqrt{\eta^2 + \gamma^2})$

$$\alpha = \gamma / (\eta + \sqrt{\eta^2 + \gamma^2}) \quad (8)$$

식(7)을 이용하면 $z=0$ 인 점에서의 BSO에 입사하는 평면파와 $z=l$ 점에서의 평면파 전계 x, y 방향 성분을 표현하는 matrix가 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_{z=l} = (J) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_{z=0}$$

$$(J) = \begin{bmatrix} \cos(\phi/2) - j \cos \chi \sin(\phi/2) & -\sin \chi \sin(\phi/2) \\ \sin \chi \sin(\phi/2) & \cos(\phi/2) + j \cos \chi \sin(\phi/2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

단, $\phi = \delta l \approx [\omega^2 \mu (\eta^2 + \gamma^2) / \epsilon]^{1/2} \cdot l$

$$\cos \chi = (1 - \alpha^2) / (1 + \alpha^2)$$

$$\sin \chi = 2\alpha / (1 + \alpha^2) \quad (10)$$

식(9)를 이용함으로써 그림 1에서 센서에 생기는 광강도 변조식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-j\pi/4} \end{bmatrix} (J) \begin{bmatrix} E_0/\sqrt{2} \\ E_0/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

\uparrow 출력 \uparrow 검광자 \uparrow 1/4 파장판 \uparrow BSO \uparrow 입력

여기서 E_{11} 는 검광자에 평행한 방향의 광파이고 E_{\perp} 는 수직성분 광파이다.

식 (11)을 전개하면

$$\begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{\perp} \end{bmatrix} = \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} \cos(\phi/2) + \cos \chi \sin(\phi/2) - j \sin \chi \sin(\phi/2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\therefore E_{11} = E_0/2 \{ \cos(\phi/2) + \cos \chi \sin(\phi/2) - j \sin \chi \sin(\phi/2) \} \quad (12)$$

광의 강도는 전계성분의 크기에 대한 자승으로 나타내므로 센서에 가한 입력광강도와 출력광강도의 관계는 $T = \text{출력광강도} / \text{입력광강도}$ 에 의하여 최종적으로 식(13)과 같이 된다.

$$T = \frac{|E^{11}|^2}{|E_0/\sqrt{2}|^2} = 1/2 \{ \cos(\phi/2) + \cos \chi \sin(\phi/2) \}^2 + \sin^2 \chi \sin^2(\phi/2) \} = 1/2 (1 + \cos \chi \sin \phi) \quad (13)$$

식 (13)에서 선광성이 없는 경우 $\chi=0$ 이므로 $\cos \chi=1, \phi = \omega \eta \mu / \delta \cdot \ell = \pi V (\lambda_0 / 2n_0^3 \gamma_{41})$ 이다.

$$T = 1/2 \{ 1 + \sin(\pi V / V_\pi) \} \quad (14)$$

$V_\pi = \lambda_0 / 2n_0^3 \gamma_{41}$ 이 된다.

식(14)는 통상의 pockels 소자를 응용한 광변조기의 변조특성을 표현하는 식과 동등하다. 즉 BSO에 있어서 V_π 의 물리적인 의미는 결정의 두께가 선광을 무시할 정도의 얇은 경우의 반파장전압을 의미하고 소자에 따라 결정되며 2개의 편광성분에 위상차가 π 만큼 생겼을 때의 전압으로서 해당 소자로 측정할 수 있는 전압의 크기에 영향을 미치는 중요한 값이다.^[15] 여기서 사용한 BSO의 반파장 전압은 식(14)에 의해 계산해 보면 0.87 μm 의 파장에서 약 6800V가 된다. 결정이 두껍게 되면 선광의 효과에 의해 실제의 반파장 전압이 V_π 와 다른 값이 된다. 식(1), 식(8), 식(10)을 이용해서 식 (13)을 바꿔쓰면 본 센서에 생기는 광강도변조를 표현하는 아래식이 얻어진다.

$$T = 1/2 \{ 1 + (\pi V / V_\pi) \times f(V) \}$$

$$f(V) = \frac{\sin[g(V)]}{g(V)}$$

$$g(V) = [(\pi V / V_\pi)^2 + (2\theta \ell)^2]^{1/2} \quad (15)$$

이는 전극간에 인가한 전압에 의해서 투과광의 크기를 진폭 변조할 수가 있다. 식 (15)는 sine 값으로 표시되므로 변조기의 광학 bias에 의해 조정 가능하다. 강도 변조의 bias를 $V_\pi/2$ 까지 끌어 당기면 공급전압에 대하여 거의 직선성인 투과광의 변조특성을 얻을 수 있다.

III. BSO 전압 센서 구성

BSO 단결정의 전기광학효과를 이용한 전압센서의 구성을 그림 4에 나타내었다. 표준전압을 인가하기 위해서 YOKOGAWA사의 voltage standard 모델 YEW-2558을 사용하였고 편광자 및 검광자는 가로×세로×높이가 5×5×5mm인 polarizing beam splitter (PBS)를 사용하였다. BSO는 광로장×가로×세로가 4.70×5.00×7.00mm인 것을 양단면에 ITO 투명

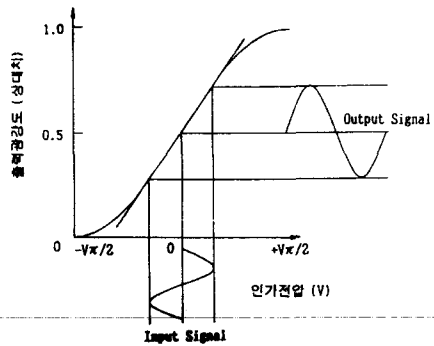


그림 3. 인가전압과 출력광강도의 관계
Fig. 3. Relation between applied voltage and optical output.

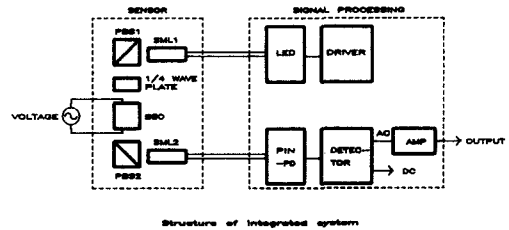


그림 4. 전체시스템 구성도
Fig. 4. Structure of integrated system.

전극을 입혀 균등전계가 결정 격자에 가해지도록 하였으며 외부에서 전압을 빛의 진행방향과 같은 종형으로 인가하기 위하여 silver paste로 전압인가 단자를 BSO 센서의 상단에 붙여 사용하였다. 송수광부와 센서와의 사이를 멀티모드 광파이버(코어/클래드경: 100/140 μm)로 연결하고 여기에 연결되는 광콘넥터는 μBNC 형 콘넥터를 제작하여 사용하였다. 이때 콘넥터 내부의 렌즈는 SML(selfoc micro lens)를 이용하여 설계하였으며 SML의 기본적인 기능중 평행빔 형성과 집광용으로 사용하였다.

한편, 전압센서와 광학소자를 보호하기 위하여 알루미늄 케이스를 제작하여 편광자와 검광자, 1/4장판, BSO 소자를 내부에 넣어 몰딩하여 먼지, 습기, 충격에 적응하도록 하였고 전압인가 단자와 콘넥터 부분만 외부에 노출되도록 하였다. 그림5에 개발된 광전압 센서의 내부를 나타내었다.

전압 센서부는 4개의 optical component로 구성되어 있음을 알 수 있다. 우선 편광자는 LED에서 오

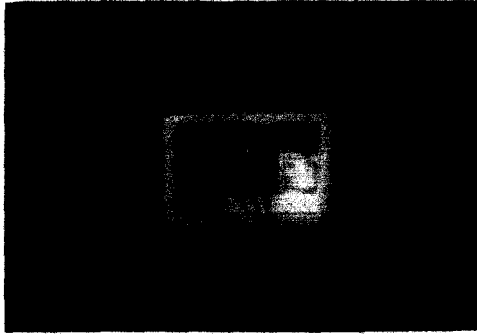


그림 5. 광전압 센서의 개발모형
Fig. 5. Development model of optical voltage sensor.

는 랜덤한 광을 90° 꺾어서 선형 편광된 광으로 만들고 이 선형 편광된 광이 1/4파장판을 통과하여 서로 직교 성분의 광을 $\pi/2$ 만큼 위상차를 주어 어느 각도에서나 크기가 일정한 원편광으로 만들어 준다. 이때 BSO pockels소자에 전압을 인가하면 원편광이 타원편광으로 변하며 이 타원 편광된 광을 검광자를 통하여 검광하고 증폭 후 신호를 검출한다.

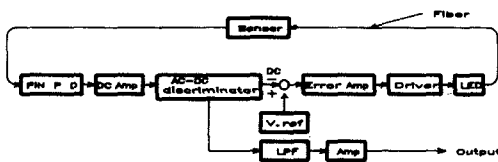


그림 6. 신호처리부 블럭다이어그램
Fig. 6. Block diagram of signal processing part.

그림 6은 신호처리부(E/O, O/E 변환기)의 블럭다이어그램을 나타낸다. 광원으로는 고휘도 발광다이아이드(파장: $0.87\mu\text{m}$)를 사용하고 광검출소자로는 pin-photodiode를 이용하였다. 그림 6에서 본 센서를 이용하려면 직류성분의 광을 센서에 투과하여 센서에서 변조된 광강도의 교류 성분을 검출하면 된다. 그러나 본 센서에서 중요한 것은 감도이다. 따라서 센서를 돌아오는 평균광파워(평균수신 광파워)의 강약에 의하여 광의 변조 신호분이 변하고 이것이 측정오차의 요인으로 나타난다. 평균수신광파워는 발광소자의 온도특성 때문에 1% 수준에서의 제어는 어렵다. 따라서 광의 변조신호분과 평균수신광파워의 비를 검출하여 평균수신 광파워의 변동이 미치는

측정오차의 영향을 보상하는 방식(APC:automatic power control)을 적용하여 회로를 구성하였다. 실험에 의하여 평균수신광파워의 변동이 8dB이하에서는 출력값의 오차는 0.3% 이하로 검출 가능함을 알 수 있었다.

IV. 실험결과 및 고찰

그림 4와 같은 시스템을 구성하고 광전압 센서부에 광을 입사하고 60Hz의 표준 전압을 센서에 가하면 변조된 광의 교류성분을 출력으로 얻을 수 있다. 입력전압을 0V에서 1000V까지 변화 시키면서 출력신호를 검출한 결과 그림 7과 같은 특성을 얻었다.

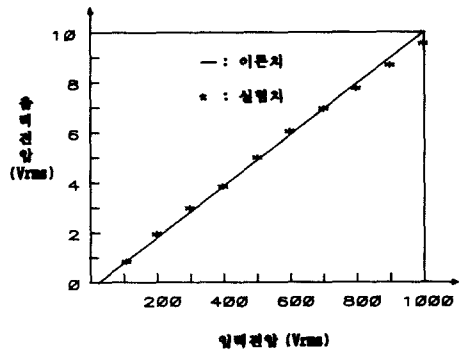


그림 7. 입력력 특성 그래프
Fig. 7. Input-output characteristics.

그림 7에서 알 수 있듯이 입력전압이 50V일 때 6%의 오차를 가지며 이는 낮은 전압에서 생긴 오차이므로 그다지 문제가 되지 않으며 50V 이상에서 800V까지는 오차율 $\pm 2.5\%$ 이내로 측정할 수 있음을 알 수 있다. 800V와 1000V 사이에서의 오차는 $\pm 2.5\sim 6.5\%$ 로 나타났다. 그림에서 처럼 입력전압이 증가하면서 포화치의 증가가 두드러지는데 이는 광강도 변조방식의 거리에 대한 선광성의 영향을 고려한 식(15)를 살펴보면 $f(V)$ 항에서 인가전압의 증가에 따라 $f(V)$ 값이 감소하기 때문에 생긴다. 식(15)와 그림 3에서 실제 이론상 인가전압이 1,000V일 경우 나타나는 오차는 1% 범위내에 있는 것으로 알 수 있다. 따라서 실험과의 오차율이 차이가 나는 것은 광원의 파장의 변동이나 BSO 소자의 길이에 대한 오차 및 선광성에 기인되는 것으로 판단된다. 이러한 원인들을 제거하면 이론적인 값과 일치되는 선형성

을 얻을 수 있을 것이다. 따라서 완전한 원편광을 입력하여 BSO 소자의 optical rotatory power (선광성)의 영향을 줄이면 높은 전압에서도 포화치를 작게하여 정도 높은 측정이 가능하다. 그림 8은 아날로그 입력신호(60Hz, 200V)에 대한 광전압 센서의 출력파형을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 아날로그 입력신호의 재현성이 우수함을 확인할 수 있다. BSO 전압센서의 온도특성을 알아보기 위해서 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 까지 항온조의 온도를 자동 조절하고 항온조 내부에 광전압 센서를 넣고 외부에서 광신호를 인가하고 센서를 통한 광신호를 다시 광파이버로 외부의 수광부에 입력하여 결과를 관측하였다. 표준 전압을 1000V에 놓고 상온(20°C)을 기준으로 10° 상승/하강시 출력전압의 변화율을 측정한 결과 그림 9에서와 같이 최대 0.53% (-10°C)로 나타났으며, 즉, -20°C 부터 60°C 까지 0.6% 미만의 변화율로 측정 가능하였다. 또 BSO 센서의 주파수 특성을 알아보기 위하여 입력전압의 주파수를 DC~10MHz 까지 변화하면서 입력값에 대한 출력값의 감쇄량을 측정 한 결과 그림10과 같은 특성이 얻어졌다. 그림에서 알 수 있듯이 차단주파수가 수 100KHz인 저역통과 필터의 특성을 가지는 광전압센서임을 확인할 수 있다.



그림 8. 광전압센서의 출력파형
Fig. 8. Output waveform of optical voltage sensor.

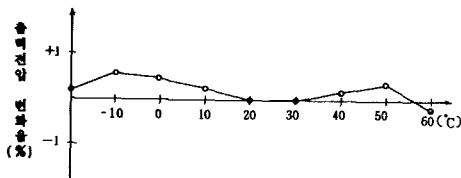


그림 9. 온도변화에 대한 BSO 센서 감도
Fig. 9. Sensitivity of BSO sensor with temperature.

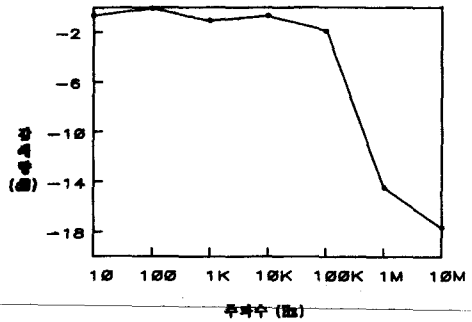


그림 10. 주파수 특성
Fig. 10. Frequency characteristic.

V. 결 론

본 연구에서는 단결정인 BSO와 광학소자를 이용하여 전기광학 변조기와 광전압 측정 시스템을 구성하고 그 특성을 실험하였다.

실험에 앞서 맥스웰방정식과 파동방정식을 이용하여 결정중에 생기는 광파의 전파 특성에 관한 행렬식을 구하고 센서가 갖는 광강도 변조식을 유도하였다. 이와 같은 이론적 분석을 토대로 광전압 센서와 함께 측정 시스템을 구성하고 광전압센서에 광을 입사, 교류전압을 가한 상태에서 입출력 특성을 조사한 결과 50V~800V 범위에서 오차율 $\pm 2.5\%$ 이내로 매우 양호한 직선성을 얻을 수 있었고 아날로그 입력신호의 재현성이 우수함을 확인할 수 있었다. 전압이 클수록 오차가 커지는 것은 BSO 소자 자신이 갖고 있는 반파장 전압의 한계성 때문에 발생하는 것으로 사료되며 온도 특성은 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 범위에서 변화율은 $\pm 0.6\%$ 미만으로 안정성을 보여주었고 주파수 특성은 DC에서 부터 100KHz까지 특성이 양호한 광전압 센서임을 확인할 수 있었다. 이러한 BSO 전압센서를 대전력계통에 이용하기 위해서는 공간전계 또는 분압하여 측정하는 방법등을 고려할 수 있다. 이와같이 광전압센서는 전기환경에 강하고 간편하기 때문에 앞으로 전력계통에서 상용전압은 물론 과도전압 측정, 고장점탐지 등 계측 및 제어시스템에 크게 활용되리라 기대된다. 따라서 본 논문의 결과로 결정센서(BSO)를 이용한 전압측정에서 다음과 같은 장점을 가지고 있음을 알 수 있다.

- 전송로는 광파이버를 채용하기 때문에 센서부와 측정기기를 전기적으로 절연시킬 수 있고 무유도 측정이 가능하다.

- 센서부는 수동소자이므로 고압측에 능동소자를 배치할 필요가 없다.
- 센서부는 금속을 포함하지 않기 때문에 피측정 전계에 미치는 영향이 적고, 고임력 임피던스로 전압, 전계측정이 가능하다.
- BSO 단결정은 온도안정성이 우수하다.

参 考 文 献

- [1] A.J. Rogers, "Optical Methods for Measurement of Voltage and Current on Power System," *Opt. Laser 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. Giallorenzi, "Optical Fiber Sensor Technology," *IEEE Trans. on Microwave Tech.*, vol. MTT-30, no. 4, p. 472, April 1982.
- [4] T. Takagi, et al., "Development of an Intrastation Optical-Fiber Data Transmission System for Electric Power Systems" *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, vol. PAS-99, no. 1, Jan./Feb. 1980.
- [5] D.C. Erickson, "The Use of Fiber Optics for Communications, Measurement, and Control Within High Voltage Substations," *IEEE PAS, PAS-99*, no. 3, 1980.
- [6] S.J. Huang, Dennis C. Erickson, "The Potential Use of Optical Sensors for the Measurement of Electric Field Distribution," *IEEE Tran. on Power Delivery*, vol. 4, no. 3, July 1989.
- [7] A.M. Smith, "Polarization and Magneto-optic Properties of Single Mode Optical Fiber," *Applied Optics*, vol. 17, no. 1, 1978.
- [8] K. Kyuma, et al., "Fiber optic Current and Voltage Sensors Using Bi₁₂SiO₂₀ Single Crystal," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-1, no. 1, p. 93, 1983.
- [9] H.J.M. Hulshof, W.R. Rutgers, A.H.V.D. Wey, "Optical Voltage Sensor: applications in electric power systems," *Fourth Int. Symp. on optical and Optoelectronic Applied Range and Engineering*, 30 March-3 April, 1987.
- [10] R.E. Hebner, et al., "Optical Methods of Electrical Measurement at High Voltage Levels," *Proc. IEEE*, vol. 65, no. 11, p. 1524-1548, 1977.
- [11] A.J. Rogers, "Method for Simultaneous Measurement of Current and Voltage on High Voltage Lines Using Optical Techniques," *Proc. IEEE*, vol. 123, pp. 957-960, 1976.
- [12] Albert Feldman, William S. Brower, "Optical Activity and Faraday Rotation in Bismuth Oxide Components," *Appl. Physics Letters* vol. 16, no. 5, 1970.
- [13] Tabor, Chen, "Electromagnetic Propagation Through Materials Possessing both Faraday Rotation and Birefringence," *J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 2, p. 2760-2765, 1969.
- [14] A. Yariv, "Quantum Electronic," *CBS College Publishing*, New York, 1985.
- [15] Yariv and Yeh, "Optical Waves in Crystals," *Wiley-Interscience Publication*, 1984.

著 者 紹 介

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

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