

SiO<sub>2</sub>포켈 소자를 이용한 광전압센서\* \* \* \* \*  
신건학, 추진부, 조흥근, 김석구, 김요희, 김영수, 박해수

\* : 한전기술연구원 \*\* : 한국전기연구소

Optical Voltage Sensor Using SiO<sub>2</sub>Pockels Cell\* \* \* \* \*  
K.H.Shin, J.P.Chu, H.K.Cho, S.K.Kim, Y.H.Kim, Y.S.Kim, H.S.Park

\* : KEPCO \*\* : KERI

## Abstract

This paper reports the principle, system configuration, test results of optical voltage sensor using quartz pockels cell. The Pockels effect of quartz material is used for designing optical voltage sensor. The quartz material has very high half-wave voltage, so, it can be applied to measure high voltage level.

Experimental results show that the optical voltage sensor has excellent linear characteristics within the applied AC voltage of 1200V.

## I. 서론

최근 광파이버 기술의 발전에 따라 광파이버 센서에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 광파이버 센서기술은 광의 다양한 파라메타 즉 「진폭, 파장, 위상, 편파면」 등과 「반사, 흡수, 굴절, 분산, 산란, 간섭, 회절」 등의 여러 현상과 효과들을 복합하는 기술이다. 광이 기본적으로 갖고 있는 전기적 절연성, 안정성, 소경량성, 병렬처리성, 비접촉성, 고감도성을 전기설비에 활용할 수 있으므로 효율적인 시스템 구성이 가능하다. 최근 이러한 장점을 가지는 광학소자 센서를 개발하여 전압(전계) 및 전류(자계) 측정 등에 활용하고자 활발한 연구가 진행중이다. 광학소자에 의한 전압계측의 원리로서는 Pockels 및 Kerr 효과 등이 이용되지만 본 연구에서는 Pockels 효과를 이용하였다. 전기광학 소자로는 수정, ADP, KDP, LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, BSO, BGO 등이 이용되고 광원으로는 He-Ne 레이저가 주로 사용되어 왔으나 최근에 반도체 소자기술의 발달에 따라 실용적인 시스템 구성이 쉬운 반도체 광원 및 수광소자를 이용

하여 시스템 설계가 진행되고 있다.

본 논문에서는 전기광학 소자로 점군 32계열인 SiO<sub>2</sub> 결정과, 1/4파장판, 편광자, 검광자를 결합하여 광전압 센서를 설계하였고 반도체 LED 및 PIN-PD를 이용하여 E/O 변환기 및 O/E 변환기를 설계 제작하였다. 다중모드 광파이버(100/140 $\mu$ m)를 이용하여 센서부와 O/E, E/O 변환기를 연결하고 전압측정 실험을 행하였다.

## II. 전기광학 효과와 광변조

전기광학 효과가 있는 SiO<sub>2</sub> 결정을 전계중에 배치하고 그림 1과 같은 방향으로 빛을 입사시키면 편광자에서는 직선편광이 되고 1/4 파장판에서는 직교성분의 굴절률 차이에 의해  $\pi/2$ 의 위상차가 생겨 원편광이 된다. 이때 SiO<sub>2</sub> 결정에 전압(전계)을 가하면 복굴절 현상에 의해  $\delta$ 만큼 위상차가 발생하여 타원편광이 되고 검광자를 통하여 광강도 변조가 되어 전압의 변화가 광의 강약으로 나타나 전압측정이 이루어진다. 이때 센서내부의 각각의 광학소자에서 이루어지는 편광상태의 변화는 그림2와 같다.

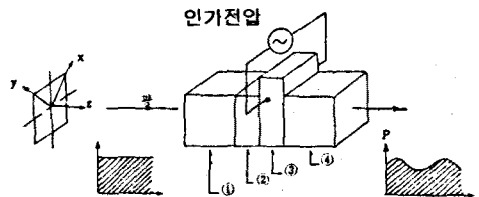
①편광자 ② 1/4 파장판 ③ SiO<sub>2</sub> ④ 검광자

그림 1. 센서에서의 광강도 변조 상태

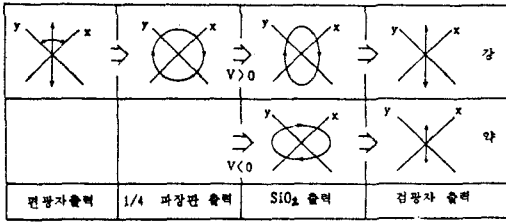


그림 2. 센서부에서의 광의 편광상태

굴절률의 변화가 전계의 1승에 비례하는 현상을 Pockels 효과라 하고 대표적인 결정으로 수정, BSO, BGO, LiNbO<sub>3</sub> 등이 있으나 본 연구에서는 반파장 전압이 큰 수정 (SiO<sub>2</sub>) 결정을 이용하여 횡형 변조방식의 광변조기를 제작하였다. 수정의 전기광학효과 특성은 표1에 나타난 바와 같으며 Z축 방향으로 전계를 인가한 경우에는 전기광학효과가 일어나지 않고 X축이나 Y축 방향의 전계에 대하여 효과가 있음을 알 수 있다. 입사광의 방향과 인가전계의 방향에 의해 광학적 위상차가 표2에서 처럼 다르게 되므로 광변조기 설계시 고려해야 할 사항이다. 특히 수정은 반파장 전압이 다른 결정에 비해 크므로 고전압 계속용 센서로 유리하다.

표 1. SiO<sub>2</sub>의 전기광학효과 특성

Point Group : 32									
인가전계방향	X축			Y축			Z축		
입사광 방향	X축	Y축	Z축	X축	Y축	Z축	X축	Y축	Z축
전기광학효과	○	○	○	X	○	○	X	X	X
자연특 굴절	유	무				무			

표2. 입사광/인가전계의 방향에 따른 광학적 위상차

입사광 및 인가전계 방향	광학적 위상차	반파장 전압
	$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) l + \frac{\pi}{\lambda} n_o^3 r_{11} \frac{l}{d} V$	$V_{\lambda} = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{11}} \cdot \frac{d}{l}$ (750kV)
	$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_e^3 r_{11} \frac{l}{d} V$	$V_{\lambda} = \frac{\lambda}{2n_e^3 r_{11}} \cdot \frac{d}{l}$ (375kV)

그림 1과 같은 광전압 센서부에서 각 소자들의 Jones행렬을 대입하여 입력광을 E<sub>0</sub>라 하고 검광자와 평행한 광파를 E<sub>11</sub>으로 하여 정리하여 검광자에 평행한 광파성분 E<sub>11</sub>을 구하면

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

$$E_{11} = E_0 \cdot \cos \left( \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4} \right)$$

따라서 입출력 광강도의 관계는 T = E<sub>11</sub><sup>2</sup> / E<sub>0</sub><sup>2</sup> 에 의하여 계산하면

$$T = \cos^2 \left( \frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) = \frac{1}{2} (1 + \sin\phi) = \frac{1}{2} \left( 1 + \sin \left( \frac{\pi V}{V_{\pi}} \right) \right) \quad (2)$$

식(2)에서 πV ≪ Vπ일 경우에는 T=1/2(1+πV/Vπ)의 근사 식을 적용할 수 있다. 식(2)에서 알 수 있듯이 인가 전압 V에 의해 광강도 변조됨을 알 수 있다. 인가전압과 출력광강도의 관계를 그림 3에 보인다.

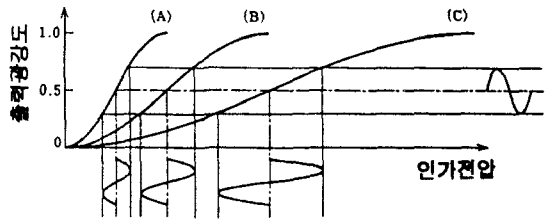


그림 3. 인가전압과 출력광강도의 관계

### III. 광전압 센서구성

SiO<sub>2</sub> 결정을 이용한 광전압 센서의 구성을 그림4에 보인다. 편, 검광자는 가로×세로×높이가 5×5×5mm 인것을 SiO<sub>2</sub>는 광로장×가로×세로가 5×5×5mm 인것을 Y축 양단면에 횡형변조방식으로 전계가 가해지도록 설계 한다. 전압 센서부는 4개의 Component로 구성되는데 LED에서 나오는 랜덤한 광을 PBS(편광자) 90° 회전 후 순형편광으로 만든 후 1/4파장판에서 직교성분의 광을 π/2만큼 위상차를 주어 원편광으로 되어 광학 bias를 준다. 이때 SiO<sub>2</sub>소자에 횡방

향으로 전압을 인가하면 원편광이 복굴절 현상에 의한 위상 변화에 의하여 타원편광으로 되며 이 위상변화를 검광자를 통하여 광강도 변조된후 수광소자로 검출하여 피측정 신호를 검출하는 원리이다.

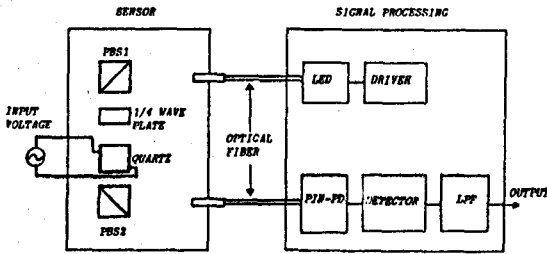


그림 4. 전체 시스템 구성도

그림 4에서의 센서와의 사이를 멀티모드 광파이버(코어/클래드경 : 100/140 $\mu$ m)로 연결하고 여기에 연결되는 광콘넥터는  $\mu$ BNC형 콘넥터를 제작하여 사용하였다. 이때 콘넥터 내부의 렌즈는 SML(selfoc microlens)를 이용하여 설계하였으며 SML의 기본적인 기능중 평행빔 형성과 집광용으로 사용하였다.

한편, 전압센서와 광학소자를 보호하기 위하여 알루미늄으로 케이스를 제작하여 편광자와 검광자, 1/4파장판, SiO<sub>2</sub> 소자를 내부에 넣어 몰딩하여 먼지, 습기, 충격에 적용하도록 하였고 전압인가 단자와 콘넥터 부분만 외부에 노출되도록 하였다.

신호처리부 (E/O, O/E변환기)의 광원으로 고투도 발광다이오드(파장 : 0.87 $\mu$ m)를 사용하고 광검출 소자로는 pin-photodiode를 이용하였다.

#### IV. 실험 및 결과

그림 4와 같은 시스템을 구성하고 광전압 센서부에 광을 입사한후 60Hz의 표준 전압을 센서에 가하면 변조된 광의 교류성분을 출력으로 얻을 수 있다. SiO<sub>2</sub>의 Z축 방향으로 광을 입사하고 Y축 방향으로 입력전압을 0V에서 1200V까지 변화시키면서 광센서 출력을 측정한 결과 그림 5와 같은 특성을 얻었다. 최대 측정도치는 1100V에서 2.2% 나타났으며 광전압 센서의 파형 재현성을 알아본 결과 100V 입력시에 그림 6과 같은 광센서 출력파형을 얻어 파형 재현성이 우수함을 확인하였다.

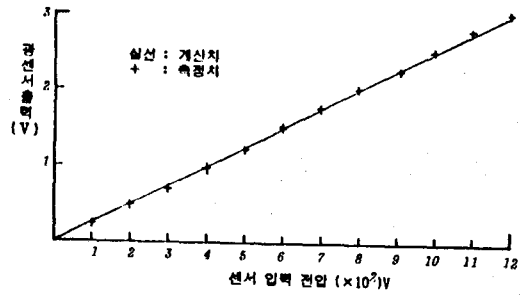


그림 5. 인가전압과 광센서 출력과의 관계

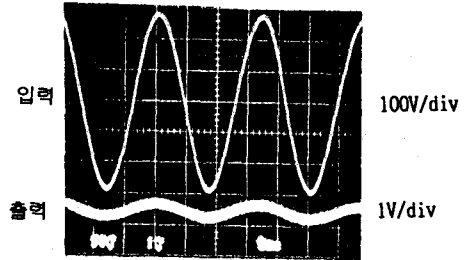


그림 6. 100V 입력시 광전압 센서 출력파형

#### V. 결론

점군 32계열인 SiO<sub>2</sub> 결정소자의 전기광학적 특성을 이용하여 광전압 센서를 설계 제작하고 시험하였다. SiO<sub>2</sub>는 입사광과 인가 전계의 방향에 따라 광학적 위상차 및 반파장 전압 계산식이 다르게 되지만 0.87 $\mu$ m 파장에서 Z축방향의 입사광과 Y축 방향의 전계에 대하여 약515KV 정도이므로 BSO 소자 (8.6KV)에 비해 매우크고 짧음성이 우수하여 고전압 (고전계) 측정에 특히 장점을 지닌다. 실험에 의하면 제작된 광전압 센서는 0~1200V까지의 인가전압 범위에서 최대로 2.2%(1100V)의 오차가 나타나 우수한 선형특성을 가짐을 확인하였다.

또 아날로그 입력신호의 재현성이 우수함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 광전압 센서는 전기환경에 강하고 간편하기 때문에 앞으로 대전력계통에서 상용전압은 물론 과도 전압측정, 고장점 탐지등 계측 및 제어 시스템에 크게 활용되리라 기대된다. 따라서 본 논문의 결과로 수정센서를 이용한 전압측정에서 다음과 같은 장점을 가지고 있음을 알 수 있다.

- 전송로는 광파이버를 채용하기 때문에 센서부와 측정기 기기를 전기적으로 절연시킬 수 있고 무유도 측정이 가능

하다.

• 센서부는 수동소자이므로 고압측에 능동소자를 배치할 필요가 없다.

• 센서부는 금속을 포함하지 않기 때문에 피측정 전계에 미치는 영향이 적고, 고압력 임피던스로 전압, 전계측정이 가능하다.

• 수정은 반파장 전압이 크기 때문에 고전계 측정에 유리하다.

## 참고 문헌

- [1] A.J. Rogers, "Optical Methods for Measurement of Voltage and Current on Power System," Opt. Laser Tech., p. 273-283, 1977.
- [2] D.C. Erickson, "The Use of Fiber Optics for Communications, Measurement, and Control Within High Voltage Substations," IEEE PAS, PAS-99, no.3, 1980.
- [3] T.G. Giallorenzi, "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE Trans. on Microwave Tech., vol. MTT-30, no.4, p.472, April 1982.
- [4] K. Kyuma, et al., "Fiber optic Current and Voltage Sensors Using  $\text{Bi}_{1-x}\text{SiO}_x$  Single Crystal," J. Light-wave Tech., vol. LT-1, no.1, p.93, 1983.
- [5] S.J. Huang, Dennis C. Erickson, "The Potential Use of Optical Sensors for the Measurement of Electric Field Distribution," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, no 3, July 1989.
- [6] Yariv and Yeh, "Optical Waves in Crystals," Wiley-Interscience Publication, 1984.
- [7] A. Yariv, "Quantum Electronic," CBS College Publishing, New York, 1985.