

## 압전소자를 이용한 광섬유 전압센서

전진우\*, 김호성  
 중앙대학교 전기공학과

### Fiber optic voltage sensor using piezoelectric material

Jinwoo Jun\*, Hoseong Kim

Department of Electrical Engineering, Chung Ang University

**Abstract** - A fiber optic voltage sensor using photoelastic effect of a single-mode optical fiber, excited with a 632.8 nm He-Ne laser, is developed. The photoelastic effect is produced by piezoelectric effect for the voltage measurement. It is found that the detector output voltage is proportional to the applied voltage. Also, the frequency of the output voltage is equal to that of the applied voltage. Experimental results from a laboratory model demonstrate the feasibility of the sensor for field application in high-voltage systems.

#### 1. 서 론

최근의 전력계통은 고전압화되어 가는 추세이며 그에 따라 전력기기도 고전압화되어 이를 측정할 수 있는 변성기(Transformer)에 대한 요구가 증가하고 있다. 그러나 이전에 사용되던 권선형 또는 캐퍼시터형 기기는 절연문제와 전자기유도장애 (ElectroMagnetic Interference)문제로 인하여 그 크기가 커질 수 밖에 없었으며, 유지 및 보수가 어렵게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 80년대부터 EMI에 강한 빛의 특성을 이용하여 광PT에 관한 연구가 활발해졌고, 광신호를 사용한 LAN시스템이 발전전소의 제어, 보호시스템에 적용되어 감에 따라 광PT에 관한 연구가 더욱 활발해져 왔다. 그러나 현재까지 개발된 대부분의 광PT는 결정체의 Faraday Rotation 효과 또는 Pockels효과[1~3]를 이용한 것이기 때문에 그러한 효과가 큰 결정체를 성장시키는 문제와 광소자의 광축정렬 문제는 제작시 양산성의 저해와 S/N비의 감소, Sensitivity의 감소, 측정오차의 증가 등의 문제점을 갖고 있다. 그런데 결정체대신 광섬유 자체의 Photoelastic특성[2~4]을 이용하여 전압을 측정하는 방법은 광섬유가 센싱과 신호전달의 두 역할을 하므로 광소자의 수를 감소시키며 광축정렬을 용이하게 할 수 있고 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 국내에서

연구된 광섬유 전압센서로는 최도인[3]등이 발표한 광PT가 있으나 이 장치는 구조적으로 진동에 약하며 설치시에 문제점을 갖고 있었다. 이에 본 연구에서는 동축케이블에 쉽게 장착할 수 있는 구조를 설계 제작하였으며 그 출력특성 및 온도특성을 측정하였다.

#### 2. 광섬유의 Photoelastic Effect

일반적으로 사용되는 Single-Mode 광섬유를 통하여 빛이 진행할 때 두가지의 수직하고 독립된, 그리고 축퇴된(degenerate) 모드가 존재한다. 이 두 모드가 진행할 때 기계적인 힘이 광섬유에 가해지는 경우 두 수직모드간의 굴절률차가 생겨 복굴절현상(birefringence)[2~4]이 일어나게 된다. 이러한 복굴절 현상을 일으키는 힘에는 광섬유의 단면을 타원형으로 왜곡시키는 측면에서 가해지는 힘(lateral stress), 그리고 광섬유를 비틀는 힘(twisted stress)이 있다. 일반적으로 twist에 의한 복굴절과 광섬유 자체의 불순물에 의한 복굴절은 미세하므로 여기서는 무시할 수 있으며 또한 실험장치에서 광섬유의 Bending에 의한 것만 이 것에 의한 복굴절 또한 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 광섬유에 대해 측면으로 작용하는 복굴절(lateral stress induced birefringence)만을 고려 하였다.

##### 2.1 광섬유의 Photoelastic 효과해석

광섬유에 측면방향(x또는 y방향)으로 힘( $f$ )이 가해질 때 발생되는 복굴절의 크기(rad/m)는 다음과 같다.[2][3][5]

$$\beta = \frac{8 * C * F}{r * \lambda} \quad (1)$$

$F$  : 광섬유 단위길이당 힘(N/m)

( $F=f/l$ ,  $l$ 은 힘을 받는 광섬유의 길이)

$\lambda$  : 진공중에서의 파장

$r$  : 광섬유의 반지름(cladding 포함)

$C$  : 광섬유 재료의 특성(stress-optic 상수)

위에서  $C$ 는 stress-optic 상수로써 다음과 같이 주어진다.[3][5]

$$C = n^3(P_{11}-P_{12})(1+\nu)/2E \quad (2)$$

- $n$  : 광섬유 코어의 굴절율
- $P_{11}, P_{12}$  : elasto-optic tensor의 요소
- $\nu$  : Poisson's ratio
- $E$  : 광섬유 재료의 Young's modulus

Piezoelectric crystal에서 전압에 의해 발생한 힘[N]은 다음과 같다.[3][6]

$$f = \frac{ea}{g_{33}} \quad (3)$$

- $a$  : Piezoelectric crystal의 단면적 ( $m^2$ )
- $e$  : Piezoelectric crystal에 가한 전기장의 크기 (V/m)
- $g_{33}$  : Piezoelectric crystal g coefficient (V-m/N)

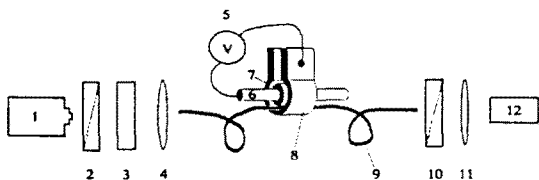
Piezoelectric Crystal에 가해진 전계가  $e=e_0\cos\omega t$ 라하고 Piezoelectric Crystal에 의해 발생하는 힘이 가해지는 부분의 광섬유의 길이를  $l$ 이라하면 이 부분에 발생하는 총위상차  $\Delta\theta$ 는 식(1),(3)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\theta = \frac{8\pi C * f}{\lambda r} = De_0\cos(\omega t) \quad (4)$$

여기서  $D$ 는 상수로서

$$D = \frac{8Ca}{g_{33}r\lambda} \text{이다.}$$

## 2.2 실험방법



1. He-Ne레이저
2. Polarizer
3.  $\lambda/4$  Plate
4. 렌즈
5. 입력전압
6. 구리봉
7. Piezoelectric C crystal
8. 철제 틀
9. 광Fiber
10. Polarizer
11. 렌즈
12. Detector

그림 1. 본 연구의 System 구성도

그림 1은 본 연구의 System 구성도이다. 그림 1에서와 같이  $\lambda/4$  waveplate의 광축에 대해 45도 각도로 입사된 직선편광파 ( $E_0e^{j\omega t}$ )는  $\lambda/4$  waveplate를 통과하면서 원형편광파로 바뀌게 된다. 이 빛이 single-mode 광섬유를 통해 진행할 때 광섬유의 외부에 힘이 가해지면 광섬유의 Photoelastic effect에 의해 가해진 힘의 방향에 대해 빛의 편광상태가 평행한 성분과 수직인 성분간에 위상차  $\Delta\theta$ 가 생겨나게 된다. 이 위상차는 원형편광파를 가해진 힘의 방향에 45도 방향의 광축을 가진 타원편광파로 변화시킨다. 위와 같은 과정에서 두 수직편광파는 각각  $E_0e^{j\omega t}/\sqrt{2}$ ,  $E_0e^{j\omega t + \pi/2 + \Delta\theta}/\sqrt{2}$ 로 되며 polarizer편광방향에 대해 90도방향의 편광방향을 갖는 analyzer를 통과할 때 두 수직편광파가  $E_0(e^{j\omega t} + e^{j\omega t + \pi/2 + \Delta\theta})/2$ 로 합쳐지면서 간섭이 일어나게 된다. 이 때 일어나는 빛의 세기변화를 광detector의 출력전압으로 측정할 수 있다. 여기서 위상차와 광디텍터 출력전압  $V_d(V)$ 와의 관계는(2){3}{5}.

$$V_d \propto \sin\Delta\theta \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있다.  $\Delta\theta$ 가 1보다 아주 작은 값일 경우에 식(5)는  $V_d \propto \Delta\theta$ 로 되며 식(4)에 의하여  $V_d$ 의 교류성분은

$$V_{dAC} \propto De_0\cos(\omega t) \quad (6)$$

이 된다. 그러므로 식(6)에서와 같이 광디텍터의 출력전압은 전계의 크기  $e_0$ 에 비례하며  $e_0$ 는 입력전압에 비례한다.

## 2.3. 실험결과

본 실험에서는 광섬유에 힘이 가해지지 않았을 경우에 편광상태가 변하지 않아야 하므로 광섬유의 길이에 따른 편광비를 측정하였다. 편광비가 500 : 1인 HeNe레이저빔을 광섬유에 입사하고 광섬유의 길이를 변화시켰을 경우 광섬유 끝단에서 나오는 빛의 편광비를 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 광섬유의 길이가 25cm 이하인 경우 편광비가 20 : 1이상 이므로 충분한 S/N비를 얻기위해 광섬유의 길이를 25cm이하로 하였다.

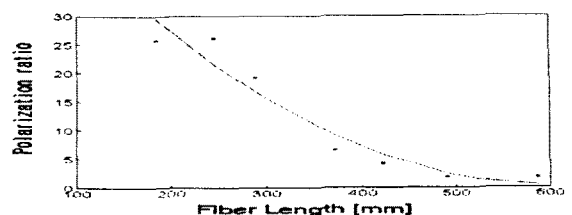


그림 2. 실험에 사용된 Optical Fiber의 길이에 대한 편광특성 (○ : 실험치, 실선 : fitting)

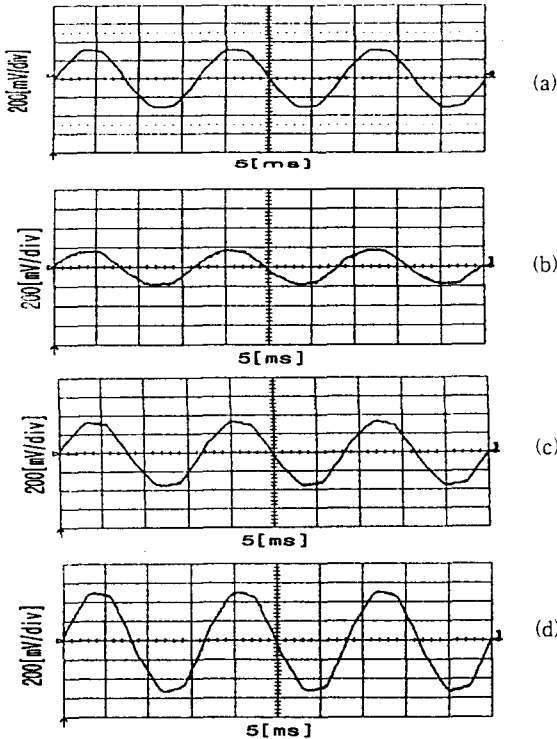


그림 3. 인가전압(a)의 파형과 각각의 인가전압이 (b)100[V], (c)200[V], (d)300[V] 인 경우의 디텍터 출력파형

**Piezoelectric crystal 에 가한 전압에 대한 광디텍터의 rms 출력전압**

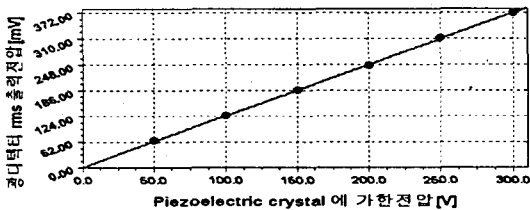


그림 4. Piezoelectric Crystal에 가해진 전압과 광Detector 출력전압의 rms값의 비교graph (· : 실험치, 실선 : fitting)

**주변온도에 대한 특성**

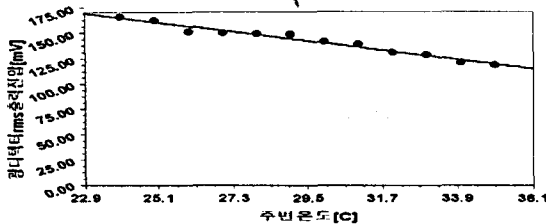


그림 5. 주변온도에 대한 디텍터 rms 출력전압

그림 3은 Piezoelectric Crystal에 가해지는 각각

의 인가전압에 따른 광디텍터의 신호전압출력과 인가전압의 출력파형이며, 이들 출력파형은 인가전압과 동일한 위상과 주파수를 가지며 각각의 인가전압에 비례하여 진폭이 커짐을 알 수 있다. 그림 4에 인가전압에 대한 광디텍터출력의 변화를 도시하였으며 선형적인 출력에 대한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 입력전압을 150[V]로 하고 온도를 36[°C]까지 올렸을 때의 출력변화를 그림 5에 도시하였으며 온도가 상승하였을 때 출력전압이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 철제틀 또는 광섬유 고정장치의 열팽창에 의한 것으로 사료되며 온도특성을 개선하기 위한 연구가 현재 진행 중이다.

**3. 결 론**

본 연구에서는 광섬유의 Photoelastic 효과를 이용하여 전압을 측정하는 방법을 제안하였으며, 실제적인 전력계통에 쓰일 수 있도록 구조를 고안해 내어 실험적으로 입증하였다. 측정전압은 피측정전압의 일차함수로 표현됨을 이론 및 실험을 통하여 확인하였으며 이러한 반응속도와 민감도 및 온도에 대한 특성에 관한 연구가 현재 진행 중이다. 대용량 초고압화 되어가는 전력시스템에 가격이 저렴하고 구조 및 보수가 간단한 광PT를 개발함으로써 광기술의 전력계통에의 응용이 가속화되며 국내외에서도 상대적으로 연구가 거의 이루어지지 않은 분야이므로 이 분야에 대한 연구 및 투자가 기대된다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

**[참 고 문 헌]**

- [1] Gerd Keiser, "Optical Fiber Communications", McGraw-Hill, 1991.
- [2] N.Rajkumar, V.Jagadeesh Kumar, and P. Sankaran, "Fiber sensor for the simultaneous measurement of current and voltage in a high-voltage system", App Opt Vol.32, pp. 1225-1228, 1993.
- [3] 최도인 & 김호성, "광섬유의 Photoelastic 효과를 이용한 광CT 및 광PT에 관한 연구", KIEE, Vol.45, pp. 916-920, 1996.
- [4] Brian & Culshaw, "Optical Fiber Sensors volum 1,2", Artech House, 1989.
- [5] A.Bertholds & R.Dandliker, "High resolution Photoelastic pressure sensor using low birefringence fiber", App Opt Vol.25, pp. 340-343, 1986.
- [6] A.J.Moulson, "Electro ceramics", CHAPAN & HALL, 1990, chapter 6.