

논문 16-9-15

## 광섬유 센서를 이용한 절연유내의 부분방전 위치검출에 관한 연구

### A Study on Partial Discharge Location in Insulating Oil using Optical Fiber Sensors

권태호\*, 이종길\*\*, 이준호\*\*\*

(Tae-Ho Kwon\*, Jong-Kil Lee\*\*, and June-Ho Lee\*\*\*)

#### Abstract

This paper shows results on the application of optical fiber sensors(OFS) for locations of ultrasonic signals in silicon insulating oil. The OFS system based on the principle of Sagnac interferometry has been designed and established for this work. The hollowed cylindrical mandrel wound by single mode optical fiber was used as a sensing component and ultrasonic signals which simulate the partial discharge in the oil have been generated by PZT actuator operated with function generator.

The experimental results shows that the OFS has a excellent performance for the PD location with resolutions less than 1% error range in the miniature insulating oil tank.

**Key Words** : Optical fiber sensor, Sagnac interferometry, Partial discharge, Ultrasonic

#### 1. 서론

최근 전력 기기에서 열화로 인한 이상유무를 측정하는 진단기술의 한 분야로 광섬유 센서를 이용한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 특히, 전력용 변압기의 열화 진단의 경우, 변압기 내부의 부분방전(partial discharge) 신호를 간접계형 광섬유 센서를 이용하여 검출할 수 있음을 실험적으로 검증한 연구가 발표된 바 있다[1-7].

부분방전은 전력 기기의 절연 상태에 대한 정보를 외부로 전달해 주는 중요한 물리량 중 하나이기 때문에 전력설비의 절연진단에 부분방전의 측정이 많이 사용되고 있다. 부분방전이 발생 시에는

초음파가 발생하는데, 그 초음파 측정함으로써 부분방전의 위치를 검출할 수 있다. 초음파의 측정에는 기존에 사용하는 AE(acousto-electric)센서와 직접 설계 제작한 중공 원통형 맨드릴 광섬유 센서를 사용하였다[8].

본 논문에서는 절연유 중에서 음압 반응에 따른 중공 원통형 맨드릴(hollow cylindrical mandrel) 광섬유 센서와 초음파 음원에 대한 연구를 바탕으로 유중에서 초음파의 거리에 따른 감도 및 음원의 위치 검출에 대한 연구를 하였다. 본 논문에서의 결과는 전력용 변압기에서 광섬유 센서를 이용한 부분방전의 효과적인 위치 검출을 위한 기초 자료로 활용될 것이다.

#### 2. 이론

광섬유가 어떤 음장(sound field) 내에서 음압(sound pressure)을 받을 때 광섬유는 세 방향으로 변형률을 보이고 이에 따라 광 경로차가 발생한다. 광섬유를 등방성(isotropic) 탄성체라고 가정하면

\* : 전력연구원 배전기술 Center

\*\* : 국립안동대학교 기계교육과

\*\*\* : 호서대학교 전기정보통신공학부

(충남 아산시 배방면 산29-1,

Fax : 041-548-6685

Corresponding Author : leejh@office.hoseo.ac.kr

2003년 2월 11일 접수, 2003년 3월 12일 1차 심사완료

2003년 4월 30일 최종 심사완료

음압에 의한 광섬유 자체의 변형은 후크의 법칙(Hooke's law)을 이용하여 구할 수 있다.

즉, 직교 세 방향 변형률  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  는 다음과 같은 식으로 표현된다[9].

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E_f} \{ \sigma_1 - \nu_f(\sigma_2 + \sigma_3) \} \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E_f} \{ \sigma_2 - \nu_f(\sigma_1 + \sigma_3) \} \\ \epsilon_3 &= \frac{1}{E_f} \{ \sigma_3 - \nu_f(\sigma_1 + \sigma_2) \} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $E_f$  는 광섬유의 영률(Young's modulus),  $\nu_f$  는 광섬유 포아손비(Poisson's ratio),  $\sigma_x$  는 광섬유 응력이다. 또한 광섬유에 음파가 작용하면 광섬유에 변형이 생기고 이로 인해 광섬유 내를 전파하는 광은 위상 변형을 겪게 되는데, 광섬유길이  $L$ 에 따른 총 위상 변화량  $\Delta\phi$  는 다음과 같은 식으로 표현된다[9].

$$\Delta\phi = knL\epsilon_1 - \frac{1}{2} n^3 kL \times (\epsilon_1 p_{11} + \epsilon_2 p_{12} + \epsilon_3 p_{21}) \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 광파수(optical wave number),  $n$ 은 굴절률(refractive index),  $\epsilon_x$ 는 광섬유의 변형률(strain), 는 Pockel 상수이다. 식(2)과 같이 광섬유의 위상  $p_{xy}$  변화량, 즉 감도는 광섬유의 길이 및 변형률에 비례하여 증가하게 된다.

### 3. 실험

#### 3.1 맨드릴 광섬유 센서의 제작

맨드릴 광섬유 센싱부는 그림 1과 같은 구조로서, 동일한 크기의 중공 원통형 맨드릴을 설계, 제작하였다[3]. 맨드릴에는 동작파장이 1550 nm의 단일 모드 광섬유를 2층으로 감아 사용하였고, 맨드릴에 감긴 단층 권수는 200회이며, 맨드릴에 감긴 광섬유의 길이는 46.1 m이다.

#### 3.2 절연유내에서 초음파 속도측정

그림 2는 100 CS의 실리콘 절연유 내에서 초음파의 속도를 측정했을때의 실험파형이다. 그림 2에 나타나 있듯이 초음파 음원인 PZT에는 펄스 폭 100  $\mu$ s, 크기 10 V의 단 펄스파를 인가하였으며

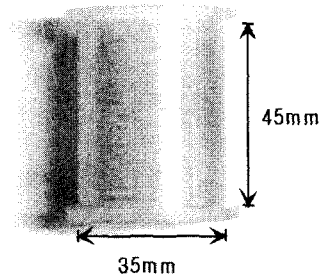


그림 1. 맨드릴 광섬유 센서.

Fig. 1. Optical fiber wound mandrel sensor.

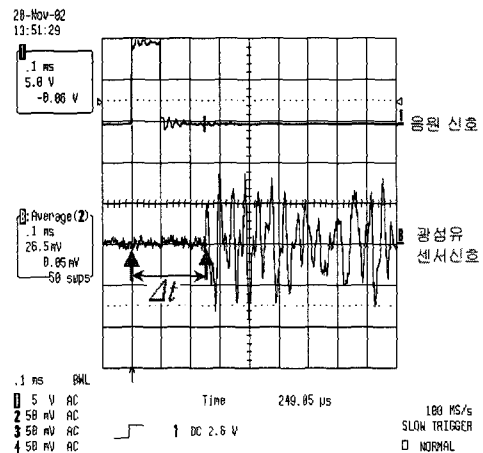


그림 2. 실리콘 절연유내에서 초음파 속도측정.

Fig. 2. Ultrasonic velocity measurement in silicone oil.

음원과 맨드릴 광섬유 센서의 이격거리는 0.25 m로 유중의 초음파 속도를 측정하였다. 초음파 음원과 광섬유 센서의 이격 거리가 0.25 m 일 때, 초음파가 맨드릴 광섬유 센서에 도착하는 시간이 약 249.05  $\mu$ s이다. 이것을 속도 공식으로 계산하면 실험수조의 유중에서의 초음파의 속도는 약 1002 m/s인 것을 알 수 있다.

#### 3.3 절연유에서 광섬유 센서의 거리에 따른 감도

유중에서 PZT와 맨드릴형 광섬유 센서의 이격 거리에 따른 감도 측정을 하였다. 맨드릴 광섬유

센서의 거리에 따른 감도 실험에서는 PZT와 맨드릴 센서와의 이격거리를 0.1 m씩 증가시키며 거리에 따른 광섬유 센서의 감도를 측정하였다. 거리에 따른 맨드릴형 광섬유센서의 감도는 그림 3과 같다. 음원의 거리에 따른 맨드릴형 센서의 감도를 정량적 분석을 위해 그림 3의 데이터를 지수함수  $y = ax^b$ 로 근사화시켜 보았다. 이때, 수치해석은 최소제곱법(least square curve fitting)을 이용하여 30회 반복된 결과값을 취하였으며, 오차의 정도는  $x^2$ 로 나타내었다. 근사화의 결과로 광섬유 센서의 감도가 이격거리의 0.59승에 반비례하고 있음을 알 수 있다. 광섬유 센서에 음파가 감지되었을 때, 광섬유 센서에 감지된 감도( $y$ )로 음원과 광섬유 센서까지의 거리( $x$ )를 계산 할 수 있다.

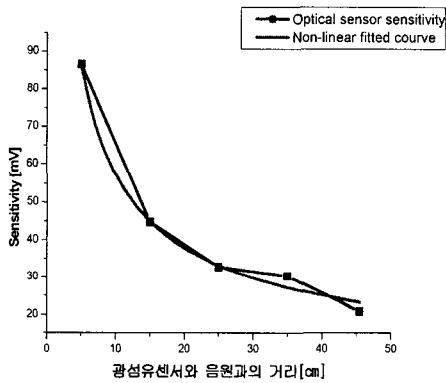


그림 3. 유중에서 거리에 따른 맨드릴 광섬유 센서 감도.

Fig. 3. Sensitivity of optical fiber wound mandrel sensor as a function of distance from ultrasonic source in silicone oil.

표 1. 그림 3에 나타난 측정data의 커브 피팅 결과.

Table 1. Curve fitting parameters of measured data in Fig. 3.

| a      | b     | $x^2$ |
|--------|-------|-------|
| 225.81 | -0.59 | 5.31  |

이론적으로 원통형음원(cylindrical wave)으로부터 발생하는 퍼져나가는 음원모델에서는, 음압이 다음 식 (3)과 같이 반경거리  $r$ 의 제곱근에 반비례한다.

따라서 본 실험의 결과는 이론적인 관계와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다[10].

$$p(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (3)$$

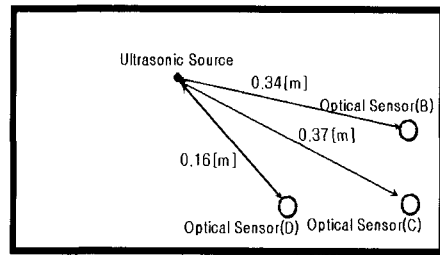


그림 4. 절연유중에서 광섬유 센서의 위치.

Fig. 4. Layout of ultrasonic sensors and source in insulating oil.

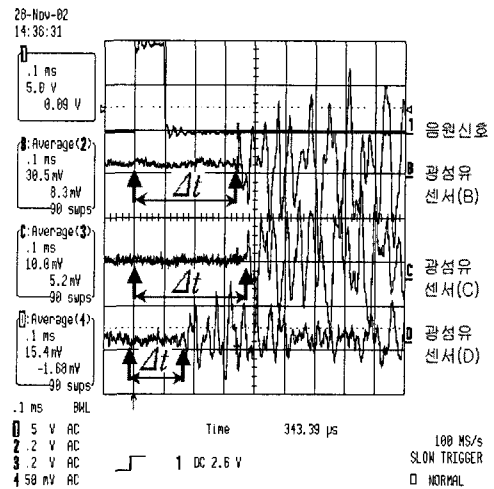


그림 5. 유중에서 초음파 음원의 위치 검출과정.

Fig. 5. Detected OFS signals to ultrasonic source signal in insulating oil.

### 3.4 유중의 광섬유 센서를 이용한 초음파 음원의 위치검출

유중에서 초음파 음원의 위치를 검출하기 위하여 3개의 센서를 그림 4와 같이 배치한 후 각각 초음파의 지연시간을 오실로스코프에 의해 측정한다.

각각의 맨드릴형 광섬유 센서 B, C, D는 초음파 음원의 펄스 발생시간부터 감지시간  $\Delta t$ 에 의해 초음파 신호가 그림 5와 같이 측정되었다. 각 광섬유 센서의 감지시간  $\Delta t$ 에 의해 맨드릴 광섬유 센서 각각 음원으로부터의 거리를 계산할 수 있다.

표 2. 광섬유 센서를 이용한 초음파 음원의 위치 검출 결과.

Table 2. Results of location detection with 3 OFSs.

| 분류<br>센서<br>위치 | 감지시간<br>[ $\mu s$ ] | 계산거리<br>[ $m$ ] | 실측거리<br>[ $m$ ] | 오차<br>[%] |
|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| B              | 343.39              | 0.34            | 0.34            | 0.4       |
| C              | 375.16              | 0.37            | 0.37            | 0.6       |
| D              | 169.28              | 0.17            | 0.16            | 1.0       |

표 2에 각 센서에 대한 감지시간  $\Delta t$ 에 대한 계산거리, 실측거리를 나타냈다. 표 2에 나타난 오차는 계산거리와 실측거리의 차를 [%]로 나타낸 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 절연유 중에서 발생하는 부분방전의 위치를 검출하기 위해 광섬유 센서를 이용한 측정 시스템을 구성한 후, 실험적 결과를 고찰하였다. 그 결과 절연유 내에서의 초음파 속도가 1002 m/s임을 확인하였다. 유중에서의 거리에 따른 초음파 감도는 이격거리의 약 0.59승에 반비례함을 측정 결과의 분석으로 확인하였다. 초음파 음원의 실제 위치와 광섬유 센서로 측정된 측정 위치의 오차범위가 1% 이내로 위치 검출에 대한 우수한 신뢰성을 검증하였다. 상기에서 제시된 광섬유 센서를 이용한 절연유 중에서의 측정 결과들은 실제 전력용 변압기의 부분 방전 위치 추정연구에 있어 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 더불어 외함에 의해 발생하는 반사파 영향을 최소화하고 이를 개선한 신호 검출기법을 개발한다면 보다 개선된 광섬유 센서 시스템을 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구과제(2001-5-302-02-2)의 지원으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] 권태호, 신대용, 이종길, 이준호, “수중에서 2개의 광섬유 센서를 이용한 초음파 음원의 위치검출에 관한 연구”, 한국전기전자재료학회 2002 추계학술대회논문집, p. 62, 2002.
- [2] 이종길, 이준호, 김상준, “광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 유중방전 신호검출”, Trans. KIEE, Vol. 49C, No. 11, p. 622, 2000.
- [3] 박윤석, 이철규, 이종길, 이준호, “간섭계형 Optical Fiber Sensor를 이용한 부분방전현상에 관한 연구”, 대한전기학회 전기물성·응용부론회 추계학술대회논문집, p. 201, 2001.
- [4] 신대용, 권기태, 이종길, 이준호, “수중에서 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유 센서의 지향성에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집(C), p. 1714, 2002.
- [5] 김상준, “광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 방전현상 검출”, 고려대학교 박사 논문, 2000.
- [6] 이종길, 박윤석, 이준호, “광섬유 간섭계 센서를 이용한 부분방전 음압 측정”, 한국음향학회지, 21권, 7호, p. 614, 2002.
- [7] Tae Young Kim, Jin Ho Nam, and Kwang S. Suh, “Measurement of discharging signal and its attenuation in insulation oils by an optical fiber sensor.”, J. of KIEEME, Vol. 12, p. 1198, 1999.
- [8] 김태성, 구할본, 임장섭, 정우성, “전력용 기기의 예방진단을 위한 부분방전측정”, 전기전자재료학회논문지, 7권, 1호, p. 42, 1994.
- [9] 이종길, 윤형규, 서인창, “끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석” 한국소음진동학회지, 6권, 4호, p. 475, 1996.
- [10] Donald E. Hall, “Basic Acoustics”, John Wiley & Sons, Inc., p. 10, 1987.