

광섬유 센서를 이용한 초음파 검출

심승환*[†] 이광식[†] 이동인[†] 이상훈[†] 김달우*[†]
 영남대학교 전자정보공학부[†] 포항산업과학연구원[†]

A Fiber-Optic Sensor for Ultrasonic Measurement

S.H. Sim*[†] K.S. Lee[†] D.I. Lee[†] S.H. Lee[†] D.W. Kim*[†]

School of Electrical Engineering and Computer Science, Yeungnam University[†] RIST[†]

Abstract - The partial-discharge(PD) is accompanied by physical and chemical phenomena, such as heat, light, noise, gas, chemical transformation, electric current, and electromagnetic radiation. The PD can be detected by measuring one of these changes. Although some techniques are employed in this purpose, several obstacles interfere with an on-line measurement. Now, a fiber-optic sensor for detecting ultrasonics is suggested for the on line measurement system with high accuracy.

This paper describes the basic principles fiber-optic sensor for ultrasonic measurement.

1. 서 론

전력시스템의 고전압화, 대용량화에 따라 전력기기의 고신뢰도 동작을 확보하기 위한 예방진단의 필요성이 증대되고 있다. 전력기기의 절연과피는 대부분 부분방전을 경유하여 발생하고 있다.

기존의 검출방법은 주로 off-line 상태의 접촉식 방법을 사용하였지만, 시스템 복잡화와 더불어 자동, 원격 제어의 필요성 증가로 기존 방법을 대체할 방법이 절실히 요구되고 있다. 최근 on-line 검출을 위해 안테나 혹은 초음파 센서를 이용하는 방안이 연구되고 있다.^[1-2] 이러한 방법은 비접촉식 on-line 구현이 가능하지만 주변 노이즈(noise)나 전자기적 결합에 의해 신호가 왜곡되는 문제점이 있다. 음향신호 측정방법에서는 통상 압전재료로 만들어진 초음파 센서를 이용하는데, 이 방법은 전기적 잡음의 영향을 받지않고 자석식 고정장치를 이용하여 원하는 부위에 설치가 용이하다는 장점을 가지고 있다.^[3-4] 그러나, 부분방전에 의해 발생한 음향신호는 초음파 센서에 도달하는 과정에서 매질이나 절연구조물 등에 의해 감쇠되기 때문에 센서로부터 먼 거리의 부분방전 신호를 검출하기 어렵다. 또한, 음향신호가 전달되는 과정에서 방전발생원으로부터 직접 전달되는 신호와 금속 벽과 같은 다른 매질을 통하여 간접적으로 전달되는 신호가 중첩되는 경우 방전크기나 위치검출이 어려워질 수 있다.^[5]

최근, 광섬유를 이용한 센서의 응용은 여러 분야에서 이용되고 있다. 센서로서의 광섬유 특징으로는 저손실성, 소형, 경량, 넓은 대역폭, 무유도성, 강한 내부식성, 특히 높은 감도(sensitivity)등의 장점을 가지고 있기 때문에 센서로서의 무한한 가능성을 가지고 있다. 부분 방전에 이용할 경우 광섬유의 재질이 유리나 플라스틱과 같은 유전체이므로 변압기 안에 위치시킬 수 있다. 또한 높은 민감도와 정확도를 가지는 센서를 구성할 수 있다. 광섬유는 전송할 수 있는 파장의 수에 따라 단일모드(single mode)와 다중모드(multi mode)광섬유로 구분할 수 있다. 다중모드 광섬유센서의 경우는 전달되는 빛의 세기가 피 측정량으로 인해 변화하는 원리를 이용하는 반면 단일모

드 광섬유센서는 외부로부터의 변화요인으로 인해 광섬유를 통과하는 빛의 위상의 변화를 많이 이용한다. 일반적으로 단일모드 광섬유센서가 센서구성의 어려움은 있지만, 높은 정밀도를 가지고 있다. 광섬유를 이용한 초음파 측정에서는 Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot 간섭계, Bragg-grating 등이 이용되고 있다.

본 논문에서는 유중방전시 발생하는 초음파를 측정할 목적으로 Mach-Zehnder간섭계 특성에 대해 살펴보고, 앞으로의 연구방향에 대해 기술하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 유중에서의 부분방전과 초음파 특성

불평등 전계 분포를 구성하고 있는 절연물에 인가전압을 서서히 증가시키면 어떤 전압 이상이 되었을 경우, 전계가 집중된 곳에서 부분적으로 방전이 일어난다. 이러한 방전을 부분방전이라 한다. 유입변압기인 경우 유중침단과 같이 심한 불평등 전계를 형성하는 전극에 전압을 인가할 때 발생하는 부분방전을 유중 부분방전이라고 한다.^[6]

부분방전은 여러 가지 물리, 화학적 현상들이 수반되며 이 중에서 전기신호나 초음파신호를 검출하여 부분방전위치를 예측하는 기법이 변압기의 예방진단 방법중의 하나로 이용된다. 유중에서 부분방전이 발생하게 되면 화학적으로는 고에너지 전자나 이온, H₂가스를 발생하고 변압기 유중에 포함되어 있는 산, 알칼리, 황 등은 변압기유의 절연내력에 나쁜 영향을 미치고 물리적으로는 다른 절연물 및 금속도 열화시키므로 변압기 사과의 주된 원인으로 작용한다. 그리고 이들 불순물 이외에도 유중에는 먼지, 수분, 흡장가스 등의 불순물이 포함되어 있는 일이 많고 이들이 변압기유의 절연내력에 상당한 영향을 미치므로 이들의 영향을 고려해야 한다. 유중에서 부분방전의 개시전압은 유중에 포함되어 있는 불순물의 정도에 따라 현저하게 달라지는데 이 현상을 이용하여 유중의 부분방전 개시전압을 측정하여 절연유의 순도를 판정할 수도 있다.

유중 부분방전 개시전압은 정확히 표시할 수는 없으나 보통의 절연유일 때 공기중에 비하여 10~15배 정도이며, 예로서 지름 0.6[mm]의 봉선을 유중에 넣은 경우의 부분방전개시 전위경도(동선 표면에서의 값)는 153(실효치)[kV/cm]의 정도로 되어 있다. 변압기내에 부분방전이 발생되면 그림 1 에서와 같이 여러 형태의 물리, 화학적 현상이 나타나며 그 중 한가지 현상으로 주파수 90~230 [kHz] 정도의 초음파 신호를 발생시킨다. 이는 부분방전이 발생한 지점 부근에서 국부적인 발열이 동반되고 그 발열에 의해서 주변의 절연유가 급격한 압축을 받아 충격파로 되어 펄스형태의 초음파를 발생시킨다는 이론에 의한다. 절연유에서 전파속도에 영향을 주는 요소로는 온도, 수분 함유량, 가스, 신호주파수, 점도, 굴절 반사계수 등이 있다. 특히 온도에 의한 속도변화는 음속에 가장 큰 영향을 미치며 절연유의 온도증가에 따라 속도가 감소하는 특성을 가진다.

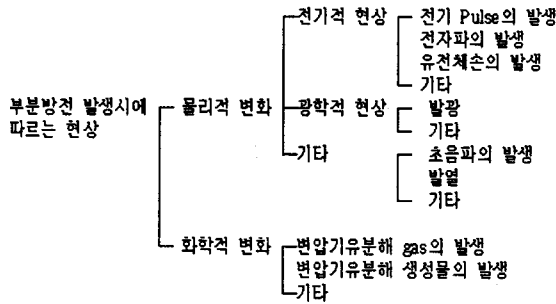


그림 1 부분방전시 따르는 현상

2.2 Mach-Zehnder 간섭계

Mach-Zehnder간섭계는 기본적으로는 다른 간섭계에 비해 간단한 장치로서 높은 민감도를 가지며 그림 2에 개략도를 나타내었다.

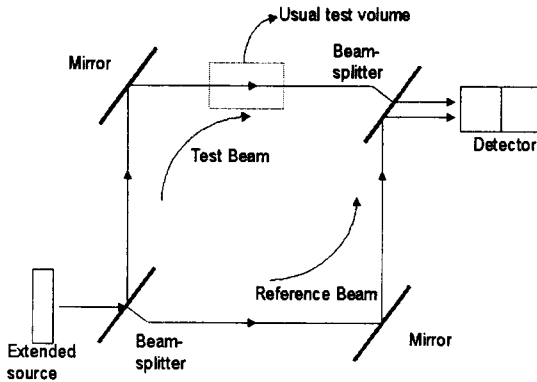


그림 2 Mach-Zehnder 간섭계 개념도

Mach-Zehnder간섭계는 그림 2와 같이 두 개의 Beam splitter와 두 개의 Mirror로 구성되어 있다. source로부터 출발한 레이저빔은 Beam splitter에 의해 같은 강도를 가지는 두 개의 빔으로 분리된다. 그런 다음 Mirror에 의해 100% 완전반사를 한다. 이때 두 경로중 하나를 Test volume으로 설정할 수 있다. 두 개의 경로를 통과한 빔은 다시 Beam splitter에 의해 재결합하여 광검출기(Detector)에서 레이저빔의 변화된 신호를 받게 된다. 그러므로 광검출기로 받은 신호를 분석하여 Reference Beam과 비교하여 Test volume의 상태를 측정할 수 있는 원리이다.

2.3 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder간섭계 구성

일반적으로 Mach-Zehnder간섭계를 응용함에 있어서 위에서 설명한 것과 같이 간섭계 그 자체를 이용할 수도 있으나, 반사경의 각도 조절과 source로부터 Detector까지의 거리 조절등의 어려움이 발생하고 noise로 인한 문제와 설치가 어렵다. 이러한 단점을 보완한 것이 Mach-Zehnder간섭계의 광경로를 그냥 공간이 아닌 광섬유를 이용한 것이다. 광섬유를 이용함으로써 외부노이즈로부터 영향을 대폭 줄일 수 있으며 optical fiber mendrel을 사용하여 광섬유를 수십번 감음으로 해서 좋은 감도를 얻을 수 있다. 아래 그림 3은 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder간섭계를 나타낸 것이다.^[7-8]

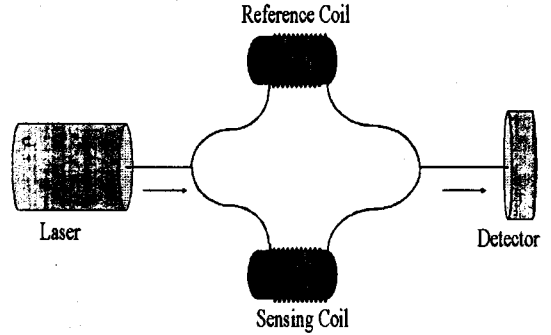


그림 3 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder간섭계

일반적으로 두 개의 다른 경로를 통과함으로써 발생하는 위상차 Φ 에 의하여 발생하는 출력빛의 세기(output intensity) I 는 다음과 같다.

$$I = A + B \cos \Phi \quad (1)$$

여기서, A 는 빛의 평균 세기에 비례하는 상수이고 B 는 두 개의 경로를 통하여 재결합된 빛의 편광상태와 세기를 나타내는 상수이다. 총 위상변위 Φ 는 일반적으로 많은 주파수 성분의 합으로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\Phi = \Phi(t) + \Phi_\omega \cos \omega t \quad (2)$$

Φ_ω 는 레이저의 주파수 변조에 의해 나타나는 위상신호를 의미하며, $\Phi(t)$ 는 초음파 음압에 선형적으로 관계하는 함수를 나타낸다. 센서에서 되돌아오는 신호로부터 $\Phi(t)$ 를 찾아 Demodulation에 이용한다. 식 (1)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$I = A + B \cos(\Phi(t) + \Phi_\omega \cos \omega t) = A + B \left[J_0(\Phi_\omega) \cos \Phi(t) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\Phi_\omega) \cos 2k\omega t \cos \Phi(t) - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\Phi_\omega) \sin \Phi(t) \sin 2k\omega t \right] \quad (3)$$

J_k 는 차수 k 의 베셀 함수(Bessel function)이다. ω 와 2ω 항을 보면 다음과 같은 결과식이 나온다.

$$I_\omega = BG J_1(\Phi_\omega) \sin \Phi(t) \quad (4)$$

$$I_{2\omega} = -BH J_2(\Phi_\omega) \cos \Phi(t) \quad (5)$$

G 와 H 는 ω 와 2ω 에 대한 missing signal의 진폭을 의미한다. Demodulation을 하기위한 sine과 cosine항의 시간 도함수는 각각의 sine항과 cosine항을 교차해서 곱하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$B^2 GH J_1(\Phi_\omega) d\Phi(t) / dt \quad (6)$$

여기서, 출력은 신호 $\Phi(t)$ 를 적분하면 된다.^[9]

2.3 실험장치

그림 4는 본 실험을 위해 광섬유 Mach-Zehnder간섭계를 이용한 실험장치도를 나타낸 것이다.

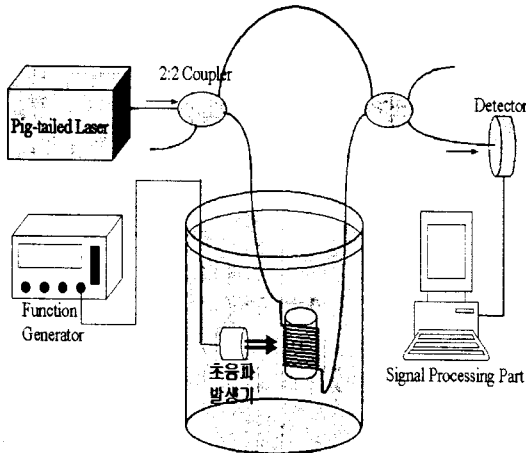


그림 4 실험장치도

그림에서와 같이 광원에서 출발한 빔은 2x2 coupler를 통하여 동일한 크기의 두 개의 빔 (beam)으로 분할된다. coupler를 지난 하나의 광(sensing part)은 유층의 초음파 발생장치를 지나 mendrel에 감긴 광섬유에 압력과 도달하게 되며, 다른 하나의 광(reference part)은 유층챔버(chamber)밖을 경유하게 된다. 이 때 서로 다른 두 개의 광경로는 같은 재질의 광섬유로 동일한 길이를 가지며 mendrel을 통과한 광은 초음파 발생기에서 나오는 초음파 음압의 세기 변화에 의해 변위를 일으켜 광경로차가 발생하게 된다.

이 실험 장치에서 광원으로는 레이저 다이오드(THORLABS S1FC635 Fiber Coupled Laser Source 635nm, 2.5mW)를 사용하였으며 레이저 다이오드와 광섬유의 연결부분은 FC connector를 사용하여 접합손실을 최소화하였다. 센서로서 사용한 광섬유는 동작파장이 630nm인 THORLABS사의 단일모드 광섬유 (Length: 10m, Fiber: FS-SN-3224, MFD/CLAD: 4.0/125mm, NA: 0.13)를 사용하였다. 맨드릴은 절연성능이 좋은 직경 3cm, 길이 10cm의 테프론 봉을 사용하였으며 광센서의 감도를 증대시키기 위해 클래딩(cladding)부분을 벗겨서 총 98회 감겨져 있다.

sensing coil은 전력용 변압기에서 발생할 수 있는 부분방전현상시 초음파 검출을 위해 절연유 내에 설치하였다. 먼저 센서의 검출도를 확인 하기 위하여 function

generator를 통해 발생된 파를 초음파 발생기에 입력하여 초음파를 발생시키고, 발생기와 sensing coil과 거리를 변화시키며 초음파 검출 능력을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 유층 부분방전에 의해 발생하는 초음파의 기본적인 특성과 이를 검출하기 위한 광섬유 센서에 대해서 기술하였다. 절연진단분야 특히 유입변압기와 같은 액체상의 절연물을 사용하는 기기의 진단에서는 초음파 측정이 많은 장점을 가지고 있다는 것은 널리 알려진 사실이다. 하지만, 기존의 초음파센서는 주변 노이즈에 의한 영향이 크고, 외부에 위치시킴으로 해서 전파 매질의 변화에 의한 영향을 많이 받았다. 새로 구성중인 광섬유센서는 Mach-zehnder간섭계를 통해 구현되었다. 광섬유를 이용한 센서의 구성을 통해 기존 초음파 측정을 통한 진단에서 장점과 더불어 고정밀 측정이 가능하다.

앞으로의 연구방향은 구성된 초음파 센서의 특성과악을 위해 유층에서 초음파 발생기를 통해 발생하는 초음파를 측정하고, 침-평판 전극과 같은 불평등 전계에서 부분방전 발생시 유층으로 전파되는 초음파를 측정 분석할 계획이다. 또한, 이러한 데이터 축적을 통해서 유층 부분방전 진단 시스템 구성의 기초자료를 제공하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- (1) Bengtsson, C., "Status and Trends in Transformer Monitoring", J.EEIS., Vol. 3, No. 2, pp. 170-173, 19
- (2) Konig, D., Narayana Rao, Y., "Partial Discharge in ical Power Apparatus", VDE-Verlag, 1993
- (3) R. T. Harrold, "Acoustic Wave-guides for Sensing Locating Electrical Discharge in High Voltage P Apparatus and System", Vol. PAS-98, No. 2, pp. 4 1979
- (4) E. Howells and E. T. Norton, "Detection of Partial arge in Transformers Using Acoustic Emission Techni IEEE Trans., PAS, Vol. 97, No. 5, pp. 1538-1549, 1
- (5) 이종길, 이준호, 김상준, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용 유층방전 신호검출", 대한전기학회 논문지, 46C권, 11호 pp. 624-626, 2000.
- (6) F. H. kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment." Butterworths, pp.1-185, 1989.
- (7) Alan D. Kersey and Anthony Dandridge, "Applica Fiber-Optic Sensors," IEEE, pp. 472-478.
- (8) A. B. Tveten, A. M. Yurek and A. Dandridge, Performance Fiber Optic Hydrophone (U)," J. Und Acoustics 40, 295, 1990
- (9) A. M. Yurek, A.B. Tveten and A. Dandridge, "A Noise Measurements in the Arcticutilizing all-Fiber Hydrophone," IEEE, pp.1677-1680, 1991