

광섬유 센서를 이용한 절연유의 방전신호 및 감쇠특성 측정

논문
12-12-15

Measurement of Discharging Signal and Its Attenuation in Insulation Oils by an Optical Fiber Sensor

김태영*, 남진호*, 서광석*, 이수목**, 김상준***

(Tae Young Kim*, Jin Ho Nam*, Kwang S. Suh*, Sue Muk Yi**, Sang Jun Kim***)

Abstract

This paper presents the preliminary results on the application of optical fiber sensor(OFS) for the measurement of discharging signals and degradation of insulation oil such as transformer and silicone oil with various viscosities. An all-optical-fiber-sensing system using a Mach-Zehnder interferometry technique was built to detect attenuation of acoustic signal produced by discharging. Simultaneous measurements were made of electrical signal and OFS signal from discharging. It was found that the arcing signal produced by needle-sphere electrode system could be detected by OFS installed in an oil bath. With increasing OFS distance from a arcing spot, the attenuation of acoustic signal became greater. From the results of sound attenuation for various insulation oils, the linear relationship was observed between the attenuation signal and log(viscosity). Details of these results are discussed.

Key Words(중요용어) : Optical Fiber Sensor, Mach-Zehnder Interferometer, Insulation oil

1. 서 론

전력케이블을 비롯한 전기설비는 사용도중 부분방전등의 전기적인 현상에 의하여 극심하게 열화되는 현상이 단점으로 지적되어 왔고, 이에 따라 전기설비의 열화상태를 알려주는 방전현상에 관한 연구가 활발하게 이루어져 왔다[1, 2]. 전기설비에서의 방전현상에 관한 연구는 크게 세 분야로 대별되는데 첫째는 방전신호의 측정 및 신호처리이고, 둘째는 이를 바탕으로 한 진단시스템의 구축이며, 셋째는 방전현상에 대한 저항성이 강한 재료의 개발이다. 이들은 절연체의 수명을 연장하거나 또는 급작스런 사고를 예방한다는 의미에서 매우 중요한 과제이다.

기존의 방전현상 측정은 크게 전기적인 방법과 비

전기적인 방법으로 나눌 수 있는데, 기존에 가장 널리 사용되어온 전기적인 방법은 방전시 발생하는 전류펄스를 측정임피던스나 CT(current transformer)와 같은 전기적 측정장치를 사용하여 검출하는 방법으로 고감도이며 조기검출이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 국내의 변전소 및 발전소에 설치된 변압기는 다중접지가 되어있어 단일 CT를 통하여 방전전류를 검출하기는 현실적으로 매우 힘들고 주변의 각종 전기적인 잡음에 의한 영향이 매우 크며 방전원의 위치를 파악하기가 힘든 단점이 있다. 비전기적인 방법은 방전시 발생하는 빛 또는 음향등을 측정하는 방법으로 최근에는 변압기를 중심으로 압전 소자로 이루어진 초음파 센서를 사용하여 방전시 발생하는 음파를 측정하는 방법이 이용되고 있다[3~5]. 이는 음파를 측정하는 방법이므로 주변의 전기적인 잡음에 의한 영향이 전기적인 방법에 비하여 작고 외부 부착식이기 때문에 설치가 매우 편리한 장점이 있지만, 음파가 전달되는 과정에서 매질에 따라 음파가 전달되는 속도가 다르기 때문에 직접경로와 간접경로를 통해 센서로 전달되는 신호의 증첩현상이 발생할 수 있으며 방전발생원의 위치를 확인하기 위해서는 여러개의 초음파센서를 부착해야 하는 불편함이 있다[6].

* : 고려대학교 재료금속공학부
(서울특별시 성북구 안암동 5-1, E-mail :
suhkwang@kucn.korea.ac.kr)

** : 한국전력공사 중앙연구원

*** : 한국전력공사 전력연구원

1999년 9월 22일 접수, 1999년 11월 23일 심사완료

광섬유 센서는 초음파 센서와 마찬가지로 음파를 검출하는 방법이지만 전력소비 내부에 직접 설치하여 간접경로에 의한 신호의 왜곡현상을 방지할 수 있다. 또한 광섬유는 주변 전자기파의 간섭을 받지 않고 분포센서로도 사용되며 고감도, 경량성, 유연성, 광대역성, 높은 절연내력등의 장점을 가지고 있어 고전압이 가해지고 있는 열악한 환경에서도 매우 유용한 측정방법이 될 수 있다[7, 8]. 현재 광섬유 센서를 방전현상의 측정에 응용하려는 연구는 활발하게 이루어지지 않고 있으나, 광섬유 센서는 신호측정부터 신호전송까지도 하나의 광섬유로 가능하기 때문에 향후 전기설비의 활선 열화진단방법으로 이용될 가능성이 높을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 절연유내에 광섬유센서를 설치하고 모의방전실험을 통해 방전시 발생하는 초음파의 응답 특성을 살펴보았으며, 동시에 기존의 전기적인 측정 방법으로도 신호를 측정하여 광섬유센서의 방전현상 측정에서의 응용 가능성을 고찰하였다. 또한 모의 열화 시험 장치를 제작하여 절연유의 열화상태에 따른 광신호의 변화를 살펴봄으로써 열화진단용 센서로서의 가능성을 살펴보았다.

2. 실험

2.1 측정원리

광섬유 센서는 광섬유를 통과하는 광이 측정하려는 물리량에 의해 변화를 받아 위상, 편광, 강도등이 변조되는 것을 검출하여 신호처리함으로써 외부 물리량을 측정하는 도구이다. 따라서 광섬유를 지나는 빛에 변화를 주는 대부분의 물리량을 측정할 수 있는데 대표적인 것으로 온도, 압력, 인장, 회전, 음압등이 있다. 광의 위상변화를 이용하는 경우에는 단일모드 광섬유가 이용되고, 광의 강도변화를 이용하는 경우에는 주로 다중모드 광섬유가 이용된다.

단일모드 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계의 개략도는 그림 1과 같다. He-Ne 레이저로부터 발생된 빛은 방향성 광결합기(directional coupler : DC)를 통하여 50:50으로 분리된 후 하나는 아무런 물리적 변화를 거치지 않는 기준부(reference arm)로 보내지고 다른 하나는 측정하고자 하는 물리량인 음향신호의 영향을 받는 센서부(sensing arm)로 보내진다. 각각의 빛은 광결합기를 통하여 다시 하나로 합쳐지는데, 이때 유증 방전시 발생한 음파의 압력으로 인하여 센서부의 광섬유는 미세한 길이변화와 굴절률 변화를 겪게 되어 빛의 광로를 변화시킨다.

따라서 합쳐진 빛은 광로의 차이에 비례하는 위상차로 인하여 간섭을 일으키게 되고 광검출기에 의해 광강도의 변화로 측정된다. 광결합기에 의해 합쳐진 광의 전계는 식 (1)과 같이 표현될 수 있고, 광검출기에 의해 검출되는 신호의 크기 I_1 은 전계 E 의 절대값으로 표현되는데 이를 식 (2)에 나타내었다[9].

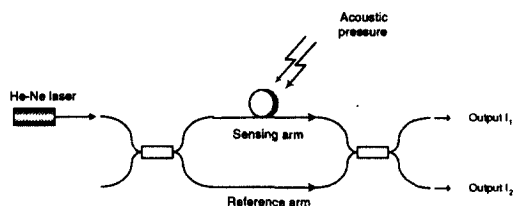


그림 1. 단일모드 광섬유를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometer using a single mode optical fiber

$$E = E_1 \exp(i\omega t + \Delta\phi) + E_2 \exp i\omega t \quad (1)$$

E_1 : 센서부를 통과하는 빛의 진폭

E_2 : 기준부를 통과하는 빛의 진폭

$\Delta\phi$: 기준부와 센서부를 통과하는 빛사이의 위상차

$$I_1 \propto 2E^2 [1 + \cos(\Delta\phi)] \quad (2)$$

따라서 기준부와 센서부 사이의 위상차 발생으로 인한 신호의 강도 변화를 검출할 수 있다. 광섬유를 통과하는 빛의 위상은 식 (3)과 같이 정의할 수 있고, 음파압력으로 인한 센서부의 굴절률 변화와 길이 변화를 고려하여 식 (3)을 압력에 의한 변수로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\phi = k_0 \cdot n \cdot l \quad (3)$$

k_0 : 진공에서의 빛의 파수

n : 광섬유 코어의 굴절률

l : 광섬유의 길이

$$\frac{d\phi}{dP} = k_0 \left(\frac{dn}{dP} + \frac{ndl}{dP} \right) \quad (4)$$

P : 음파압력

압력에 의한 굴절률 변화(dn/dP)와 길이 변화(dL/dP)를 Clausius-Mossotti 관계식과 압축률 (compressibility) K 를 적용하여 식 (4)를 변환시키면 식 (5)와 같이 된다[10].

$$\frac{d\Phi}{dP} = \frac{k_0 K}{6n\rho} (n^2 + 1)(n^2 - 2) \quad (5)$$

K : 압축률

ρ : 광섬유 밀도

식 (5)에서와 같이 굴절률과 길이의 변화가 있을 때 압력의 변화에 따라 위상의 차이가 발생함을 알 수 있고, 따라서 광섬유 센서에서 측정되는 신호의 진폭에 변화가 발생함을 알 수 있다.

2. 2 실험방법

2. 2. 1 광섬유 센서 시스템 구성

본 연구에서 사용한 광섬유 센서 시스템의 개략도는 그림 2와 같다. 본 연구에서는 방전시 발생하는 음향신호를 검출하기 위하여 측정감도가 높은 단일모드 광섬유를 이용한 호모다인 방식의 Mach-Zehnder 간섭계로 시스템을 구축하였으며, 광섬유를 통과하는 빛은 음파압력에 의한 위상변조를 통해 강도의 변화로서 검출하였다. 광원으로 632 nm He-Ne 레이저를 사용하였으며, 이 레이저에 맞는 단일모드 광섬유를 사용하였다. 센싱부는 음향신호에 대한 센싱면적을 크게 하기 위해 광섬유를 직경 40 μ m로

40 μ m 감은 코일 형태로 제작하였다. 기준부에는 편광의 변화로 인해 발생할 수 있는 신호의 소멸현상을 방지하기 위해 편광조절기(Polarization controller : PC)를 사용하였으며 신호의 드리프트 현상을 방지하기 위해 1 kHz 고주파 필터를 사용하였다. 증폭기에서 10배 증폭된 신호는 디지털 오실로스코프(Lecroy사, 9350A)에 저장되며 이를 다시 컴퓨터를 통해 신호처리하였다.

2. 2. 2 절연유 상태에 따른 음파감쇠 특성 측정

본 연구에서는 광섬유 센서의 응답특성과 절연유의 종류에 따른 음파의 전달특성을 알아보기 위한 실험을 수행하였는데 이 장치의 구성도는 그림 3과 같다. 펄스발생기에 신호를 입력하여 초음파 진동자에서 초음파를 발생시킨 후 광섬유 센서와 초음파 진동자의 거리를 변화시키면서 신호의 크기를 측정하였다. 매질 속에서 전파하는 음파는 그 매질의 밀도 혹은 탄성이 다를 경우 경계에서 반사되며 반사된 파가 입사하는 파와 서로 합해지는 신호의 중첩현상이 발생할 수 있다. 따라서 음파를 센서 방향으로만 발생시키기 위해 초음파 진동자의 한쪽 면을 에폭시로 차단하였고 음파 흡수체를 벽면에 처리하였다. 실험에 사용한 절연유는 변압기에 주로 사용되는 광유로 신유 1종, 재생유 1종, 열화유 4종으로 총 6종과 실리콘유 3종을 채유하였으며 각각의 특성을 표 1에 나타내었다. 각 오일의 점도는 Brookfield 점도계(LVDV II+)를 이용하여 측정하였다.

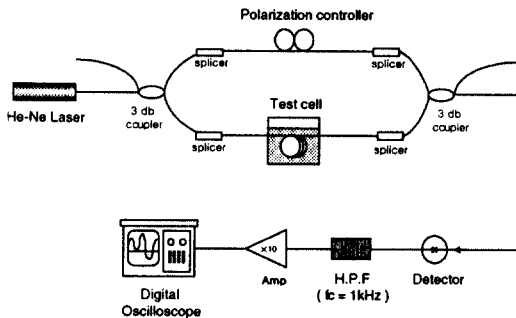


그림 2. 본 연구에 사용된 광섬유 센서 시스템의 구성도

Fig. 2. Schematic configuration of OFS system

그림 3. 절연유 상태에 따른 음파 감쇠 특성 측정장치의 개략도

Fig. 3. Experimental setup for measurements of sound attenuation in various insulation oils

표 1. 실험에 사용된 오일의 종류와 특성
Table 1. Specification of insulation oils used in this study

No.	Oil	Viscosity (cSt)	Density (g/cm ³)	Remarks
T-1	New	9.2	0.86	Transformer oils
T-2	Recycled	11.4	0.84	
T-3	Service aged since 1989	15.7	0.82	
T-4	Service aged since 1984	16.4	0.84	
T-5	Service aged since 1983	18.9	0.82	
T-6	Service aged since 1988	19.7	0.83	
S-1	100	100	0.97	Silicone oils
S-2	1,000	1,000	0.97	
S-3	10,000	10,000	0.98	

또한 실제로 변압기유를 열화시킨 후 열화시간에 따른 변압기유의 특성변화와 그에 따른 음파감쇠 특성을 확인하기 위하여 가속 열화 시험장치를 제작하였는데 그 개략도는 그림 4와 같다. 절연유의 전기적 열화와 열적 열화를 동시에 모의하기 위해 스테인레스 스틸로 모의 챔버를 제작한 후 챔버 중앙에 전극봉을 설치하여 방전을 발생시키고 가열 히터 및 열전대를 설치하여 온도를 조절할 수 있게 하였다. 전극봉은 직경이 12.5 mm인 구대구 전극 시스템을 사용하였고 전극간 이격거리는 1.5 mm로 고정하였다. 방전은 직류전원을 이용하여 발생시켰으며 방전전압은 약 20 kV로 하였고 온도는 100 ℃를 유지하였다. 샘플 시료의 채유는 광유를 열화시간에 따라 10일 간격으로 하였다

그림 4. 모의 열화 시험 장치의 개략도
Fig. 4. Experimental setup for oil ageing

2. 2. 3 유중 방전신호 측정

본 연구에서는 절연유 내에서 발생하는 방전신호를 측정하기 위해 test cell을 제작하였는데, 그 개략도는 그림 5와 같다. 방전을 발생시키기 위해 침대구 전극(needle-sphere electrode)을 사용하였는데 침전극은 바늘 침단의 곡률 반경이 10 μm인 일본 Ogura Jewel사의 트리 시험용 바늘을 사용하였으며 구전극쪽에는 마이크로미터를 이용하여 침전극과 구전극의 간격을 임의로 조절할 수 있도록 하였다. 광섬유 센서의 방전신호 측정여부를 확인하기 위하여 초음파 센서를 test cell 외부에 부착하였으며 방전 시 접지측으로 흐르는 전기적 신호는 전류프로브(Tektronix, A6302)를 사용하여 오실로스코프상에 서 광섬유 센서에 의한 신호와 동시에 관찰하였다.

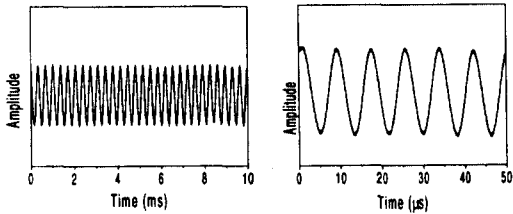
그림 5. 유중 방전신호 측정장치의 개략도
Fig. 5. Experimental setup for the detection of discharging signal in an oil bath

3. 실험결과 및 고찰

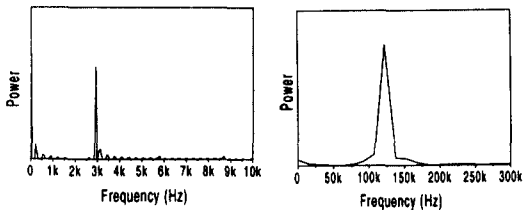
3. 1 광섬유 센서의 응답특성

먼저 광섬유 센서의 성능을 알아보기 위하여 펄스발생기를 이용하여 임의로 가청주파수 영역의 음파와 초음파를 발생시킨 후 광섬유 센서의 응답특성을 확인하였다. 그림 6 (a)와 (b)는 스피커를 통해 3 kHz의 주파수를 갖는 사인파 형태의 음파를 발생시켰을 때 광섬유 센서로 측정된 신호와 이를 FFT한 그래프이고 그림 6 (c)와 (d)는 공진 주파수가 120~130 kHz인 초음파 진동자를 이용하여 125 kHz의 주파수를 갖는 사인파 형태의 초음파를 발생시켰을 때 광섬유 센서를 통하여 측정된 신호와 이를 FFT한 그래프이다. 광섬유 센서에 의해 측정된 신호는 기준부에 가해될 수 있는 매우 미약한 진동이나 온도변화에 의한 노이즈를 제거하기 위하여 평균치를 취한 것이며, 그 결과 펄스발생기에 입력한 신호와 동일한 신호를 얻을 수

있었다. 또한 FFT 분석 결과 입력파형의 주파수와 광섬유 센서로 측정된 신호의 주파수가 정확히 일치됨을 알 수 있었다. 이를 통해 가청주파수 영역의 음파는 물론 100 kHz 이상의 주파수를 갖는 초음파 신호도 본 시스템을 통해 정확히 측정됨을 알 수 있었다.



(a) 3 kHz signal (c) 125 kHz signal



(b) FFT spectrum of (a) (d) FFT spectrum of (c)

그림 6. 광섬유 센서로 측정된 음향신호와 FFT 스펙트럼

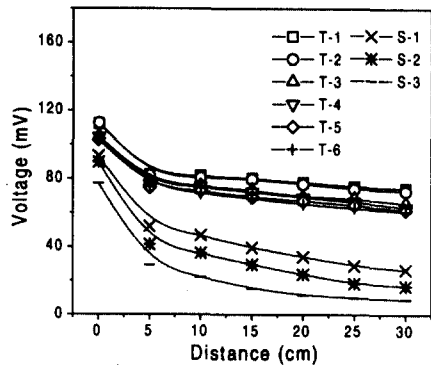
Fig. 6. Acoustic signal detected by OFS and its FFT spectrum

3. 2 절연유 상태에 따른 음파감쇠 특성 측정

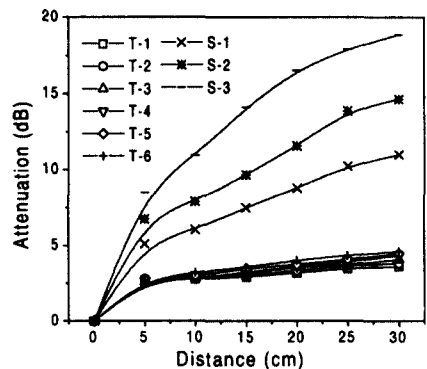
변압기 등에 사용되는 절연유의 특성은 절연유를 사용하는 전력기기의 특성을 결정하는 중요한 요소이므로 절연유의 특성을 평가하는 일은 매우 중요하다. 절연유는 산화, 수분등에 의한 오염, 과열, 방전현상 등에 의해 열화될 수 있는데, 특히 과전압이나 방전현상은 절연유 분자를 파괴하여 가연성 가스나 물을 발생시키고, 다시 산이나 슬러지등을 생성시켜 절연유의 점도를 증가시키는 원인이 된다[11]. 따라서 본 연구에서는 광섬유 센서를 이용하여 절연유의 열화상태 판단에 대한 응용가능성을 살펴보기 위해 먼저 절연유의 열화상태에 따른 음파의 전달특성을 확인하고 이에 대한 광섬유 센서의 응답특성을 살펴보았다.

그림 7은 표 1에 나타낸 여러 가지 오일내에서 초음파 진동자로 음파를 발생시킨 후 초음파 진동자와 광

섬유 센서의 거리에 따른 음향 신호의 감쇠 특성을 나타내고 있다. 이 때 발생시킨 음파는 펄스발생기에 20 Vp-p, 125 kHz의 사인파 신호를 입력하여 발생시켰으며 광신호의 크기는 평균치를 취한 신호의 최대 피크값과 최소 피크값의 차이로 측정하였고 이를 dB 단위로 다시 표시하여 그래프로 나타내었다. 각 오일에서의 음파감쇠 특성을 비교해 보면 모두 거리에 따라서 신호의 크기가 감소함을 알 수 있다. 일반적으로 매질중에 전파되는 초음파는 매질을 통과할 때 에너지의 손실이 발생하게 되어 거리에 따라 감쇠되어 간다. 초음파의 강도 감쇠는 기체나 액체에서의 확산이나 점도, 고체에서의 분자충돌과 열발생등이 주요 인이 되고 있다. 음파의 흡수에 의한 음파의 감쇠현상에 관해 일반적으로 적용되는 식은 다음과 같다.



(a) Sound attenuation in voltage



(b) Sound attenuation in dB

그림 7. 각 오일에서 거리에 따른 음파의 감쇠

Fig. 7. Sound attenuation as a function of distance for various oils

$$\alpha = \frac{16\pi^2 f^2 \eta}{2\rho_0 c^3} + \left(\frac{\nu-1}{\nu}\right) \left\{ \frac{4\pi^2 f^2 M k}{\rho_0 c^3 C_v} \right\} \quad (6)$$

여기서 α (dB/m)는 흡수계수, η 는 점성계수, c 는 매질에서의 음속, f 는 주파수, ρ_0 는 평균밀도, ν 는 정적비열과 정압비열의 비, M 은 질량, k 는 열전도계수를 나타낸다. 고체에서 음파의 감쇠현상은 일반적으로 주파수에 비례하여 고주파 성분은 신호전달거리가 증가함에 따라 급속히 감쇠하여 신호대 잡음비가 저하되는 원인이 된다. 특히 액체를 매질로 할 경우 음파 감쇠현상은 점도에 가장 큰 영향을 받는다고 알려져 있다[12]. 또한 광섬유 센서로 측정된 각 오일에서의 음파 감쇠특성 그래프를 보면 점도가 증가함에 따라서 신호의 감쇠 정도가 증가함을 알 수 있다. 즉, 같은 광유라 할지라도 신유와 열화유는 표 1에 나타난 바와 같이 밀도의 변화는 거의 없으나 전기열화와 열열화 등에 의해 점도가 증가하므로 다른 음파전달 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 점도의 증가가 음파의 진행에 내부 마찰로 작용하여 에너지 손실을 나타낸 것으로 볼 수 있다.

그림 8은 초음파 진동자와 광섬유 센서의 거리를 20 cm 떨어뜨려 놓고 20 Vp-p, 사인파 형태의 초음파 신호를 가한 조건에서 절연유의 점도에 따른 광신호의 감쇠 정도 나타내고 있다. 광신호의 감쇠 정도는 절연유 점도의 로그 스케일에 대해 선형적인 비례관계를 가지면서 증가하는 것을 알 수 있다. 실제 실험을 수행한 결과 식 (6)에 나타난 음파감쇠와 점도의 관계와는 다른 결과를 보이는데, 이것은 점도와의

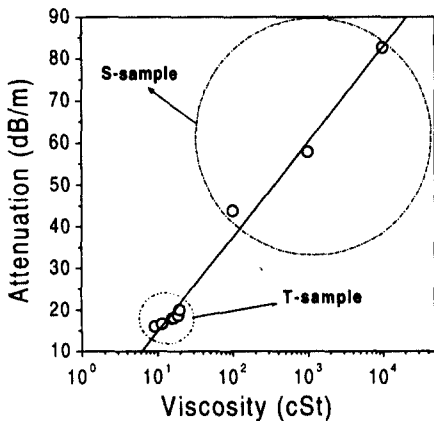
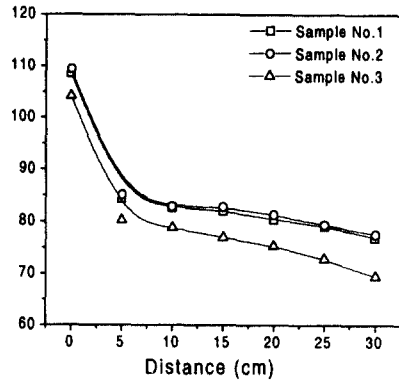


그림 8. 절연유의 점도에 따른 음파의 감쇠 정도
Fig. 8. Sound attenuation as a function of viscosity

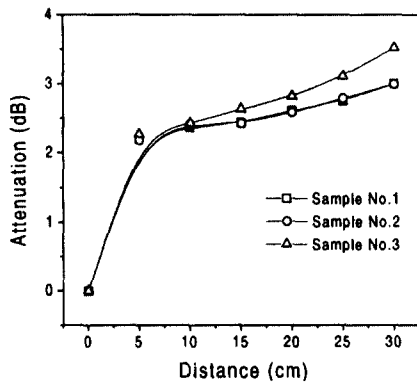
표 2. 가속열화 시험 후 채유한 오일의 종류와 특성

Table 2. Specification of insulation oils after oil ageing

No.	Viscosity (cSt)	Density (g/cm ³)	Transparency (%)	Remarks
1	8.8	0.86	96	New
2	9.0	0.82	89	after 10 days
3	13.4	0.81	68	after 20 days



(a) Sound attenuation in voltage



(b) sound attenuation in dB

그림 9. 가속열화 시험 후 채유한 오일의 거리에 따른 음파 감쇠

Fig. 9. Sound attenuation with distance in oils after oil ageing

의 다른 인자들의 영향인 것으로 사료된다.

실제로 음파의 감쇠특성이 오일의 열화에 따른 점도의 증가에 의한 것인지 확인하기 위하여 가속 열화 실험을 수행하였다. 모의 챔버내에 광유를 넣은 후 전기적 열화와 열적열화를 동시에 발생시켰으며 열화 시간에 따라 채유한 오일의 특성을 표 2에 나타내었다. 각 샘플에 대해 UV/VIS 분석을 하였는데 열화 시간이 증가할수록 가시광선 영역에서의 투명도가 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 이것은 열화가 진행되면서 절연유 내로 유입되는 금속이물질이나 이물질자체에 의해 빛이 산란되는 것으로 사료된다. 또한 점도를 측정된 결과 열화시간이 10일 후까지는 큰 변화가 없었으나 20일 후에는 오일의 점도가 증가하였다. 이것은 전기열화와 열열화의 과정에서 생성된 슬러지와 불순물에 의한 것으로 사료된다.

그림 9는 표 2에 나타난 각 오일에 대한 음파 감쇠 특성 그래프이며 열화가 진행됨에 따라서 점도가 증가하고 음파감쇠 정도도 증가함을 확인할 수 있었다.

3. 3 유중 방전신호 측정

먼저 광섬유 센서가 유중 방전신호를 제대로 검출할 수 있는지를 살펴보기 위해서 기존에 사용하던 전기적인 방법의 측정과 초음파 센서를 이용한 측정을 동시에 수행하였다. 방전발생은 침대구 전극시스템을 이용하였는데 전극간 거리는 300 μm 였고 방전전압은 약 10 kV였다. 그림 10 (a)는 절연유가 직류전압

에 의해 파괴될 때 광섬유 센서와 전류프로브에 검출된 신호를 나타낸 것으로 방전시 접지측으로 방전전류가 흐를 때 광섬유 센서도 신호를 검출하는 것을 보여준다. 그림 10 (b)는 두 신호의 시간축을 확대한 것으로 광섬유 센서로 검출한 신호는 전류프로브로 측정된 신호에 비해 시간 지연을 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 전류프로브가 방전전류를 측정하는데 반해, 광섬유 센서는 방전시 발생하는 음향신호를 측정하는 것으로 음파의 전달속도가 더 느리기 때문이다. 또한 광섬유 센서로 측정된 방전신호의 앞부분에도 단발의 펄스신호가 나타나는데 이것은 광섬유 간섭계와는 무관하게 방전시 발생하는 전자기파가 광검출기, 증폭기 또는 BNC cable등을 통해 들어오는 전기적인 잡음신호로 전달속도가 음향신호보다 빨라 방전신호와 구분된다. 그림 11은 초음파 센서와 광섬유 센서를 동시에 설치하여 검출한 방전신호로 초음파 센서에서 검출된 신호의 시간이 광섬유센서에서 검출된 신호의 시간과 잘 일치함을 알 수 있고 이를 통해 광섬유 센서가 유중 방전신호를 제대로 검출할 수 있다는 것을 확인하였다. 전류프로브에서 검출된 신호와는 달리 초음파 센서와 광섬유 센서에서 검출된 신호에서는 진동현상이 나타나는데 이는 방전시 여진을 포함하는 초음파가 발생하거나 test cell의 반대쪽 벽에서 반사된 음향파가 서로 중첩되어 계속적으로 잔향을 일으키는 것이라 생각된다.

그림 12는 광섬유 센서로 검출된 방전신호를 FFT 분석한 그림이다. 광유와 같은 액체에서는 방전으로

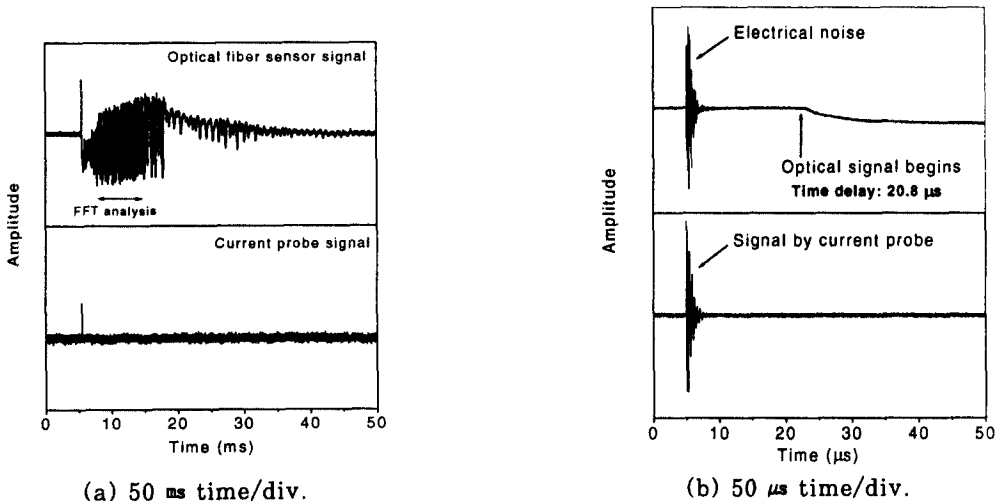


그림 10. 광섬유 센서와 전류 프로브로 측정된 방전신호
Fig. 10. Discharging signal detected by OFS and current probe

부터 폭넓은 주파수 스펙트럼을 측정할 수 있는데, 일반적으로는 80 kHz ~ 300 kHz 정도의 주파수 범위가 유용하다고 보고된 바 있다[4]. 본 실험에서는 방전시 발생하는 주파수 대역을 보다 정확히 확인하기 위하여 시간지연을 통해 전기적인 잡음신호를 배제하고 주파수 분해능을 높이기 위하여 시간축을 확대하여 신호를 획득한 후 이를 FFT 분석하였다. 500 kHz의 주파수 대역을 갖는 오실로스코프를 이용하여 여러 방전신호의 FFT 스펙트럼 분석 결과 방전신호의 특성주파수는 보이지 않았으며 그림 12에 나타난 것처럼 방전시 주파수 대역은 약 200 kHz 까지임을 확인할 수 있었다.

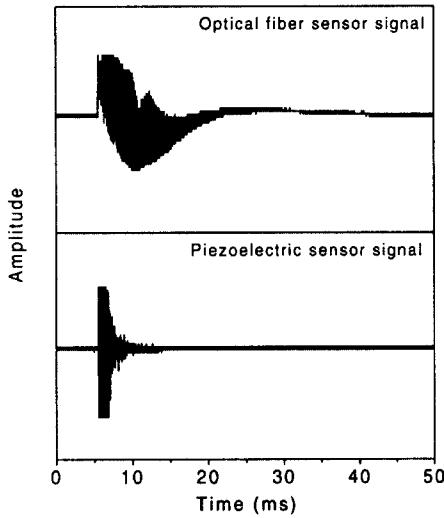


그림 11. 광섬유 센서와 초음파 센서로 측정된 방전 신호
 Fig. 11. Discharging signal detected by OFS and piezoelectric sensor

그림 13은 광섬유 센서의 유증 방전신호 측정 능력을 평가하기 위하여 방전 발생시 전압과 광섬유 센서로 측정된 신호를 정량화하여 상대 비교한 결과이다. 광섬유 센서로 측정된 신호는 신호 그 자체만으로는 전압이나 재료에 따라 특성을 비교하기 어렵기 때문에 신호의 정량화 작업을 하였는데, Σy^2 은 신호가 지속되는 부분의 진폭을 제공하여 다시 시간에 따라 적분한 값으로 방전의 에너지에 비례하는 값으로 나타난다. 그림 13에서 광섬유 센서의 신호와 방전 전압 간에는 매우 양호한 선형적인 비례관계를 보이는 것

을 알 수 있다.

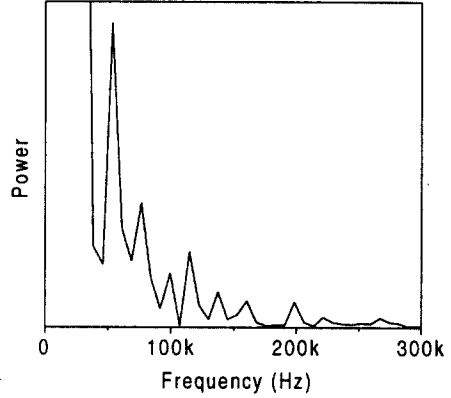


그림 12. 광섬유 센서로 측정된 방전신호의 FFT 스펙트럼
 Fig. 12. FFT spectrum of discharging signal detected by OFS

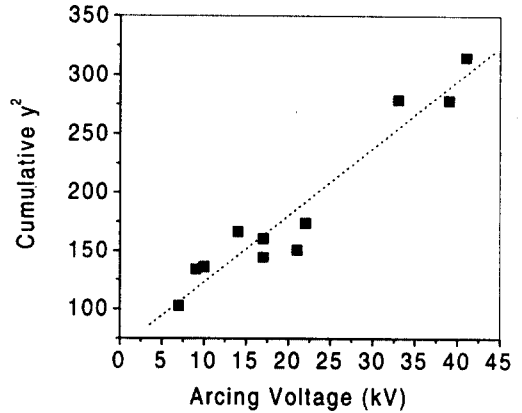


그림 13. 방전전압과 광섬유 센서로 측정된 방전신호 크기와의 상관관계
 Fig. 13. Correlation between discharging voltage and discharging signal detected by OFS

4. 결 론

본 연구에서는 Mach-Zehnder 간섭계로 구성된 광섬유센서를 이용하여 절연유에 따른 초음파신호의 감쇠현상을 측정하였으며 유증 아크방전신호를 측정함으로써 전기설비의 열화진단용 센서로서의 응용가

능성을 살펴보았다.

먼저 초음파 진동자를 이용하여 본 시스템의 응답 특성을 살펴본 결과 약 200 kHz 까지의 주파수 영역에 있는 음파를 성공적으로 측정할 수 있었다. 또한 절연유의 열화상태에 따른 음파의 감쇠현상을 측정된 결과 초음파 진동자와 광섬유 센서의 거리가 증가할수록 광신호의 크기는 감소하였으며 열화로 인해 절연유의 점도가 증가함에 따라 초음파 신호의 감쇠 정도는 점도의 로그스케일 에 대해 선형적인 비례관계로 증가하였다. 이를 확인하기 위하여 모의 챔버를 제작하여 열적 열화와 전기적 열화를 동시에 발생시켰는데 오일의 점도증가와 이에 따른 음파의 감쇠 정도 증가를 확인할 수 있었다.

이를 바탕으로 하여 광섬유 센서의 방전신호를 측정하였는데 기존에 사용하던 전기적인 방법과 초음파 센서를 이용한 검출을 동시에 수행한 결과 광섬유 센서가 유증 방전신호를 제대로 검출할 수 있다는 것을 확인하였고, 광섬유 센서를 측정된 신호를 FFT 분석한 결과 방전시 발생하는 주파수 대역은 약 200 kHz 까지임을 알 수 있었다. 또한 광섬유 센서의 방전신호 능력 평가하기 위해 신호의 정량화 작업을 수행한 결과, 방전전압과 매우 양호한 선형적인 비례관계를 보임을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. H. Borsi, "Digital Location of Partial Discharges in HV Cables", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, pp. 28-36, 1992.
2. E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of Discharge Source", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, pp. 82-92, 1992.
3. R. E. James et. al., "On-line partial discharge monitor for high voltage power transformers", Proc. 4th ICPADM, Brisbane, Australia, pp.

- 729-732, 1994.
4. R. T. Harrold, "Acoustic Technology Application in Electrical Insulation and Dielectrics", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, pp. 3-19, 1985.
5. J. Fuhr et al., "Detection and Location of Internal Defects in the Insulation of Power Transformers", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, pp. 1057-1067, 1993.
6. A. Zargari and T. R. Blackburn, "Modified Optical Fiber Sensor for PD Detection in High-Voltage Power Equipment", Conf. Record of 1996 IEEE ISEI, Vol. 1, pp. 424-427, 1996.
7. A. Dandridge and A. D. Kersey, "Overview of Mach-Zehnder Sensor Technology and Applications", Fiber Optic and Laser Sensors VI, Proc. SPIE Vol. 985, pp. 34-52, 1998.
8. F. Tosso, Fiber Optic Communications Handbook, TAB Professional and Reference Books, McGraw-Hill, PA, USA, 1990.
9. B. Culshaw and J. Dakin, Optical Fiber Sensors : System And Applications, Artech House, pp. 330-380, 1989.
10. J. A. Bucaro and T. R. Hickman, "Measurement of Sensitivity of Optical Fibers for Acoustic Detection", Applied Optics 18, pp. 938-940, 1979.
11. H. G. Erdman, "Electrical Insulation Oils", ASTM, pp 47-55, 1988.
12. L. E. Lungard, "Partial Discharge Part X III : Acoustic Partial Discharge Detection-Fundamental Considerations", IEEE Elec. Insul. Mag., Vol 8, No 4, pp. 25-31, 1992.