

광섬유 간섭계 센서를 이용한 부분방전 음압 측정

Detection of Partial Discharge Acoustic Signal Using the Optical Fiber Interferometric Sensor

이 종 길*, 박 윤 석**, 이 준 호***
(Jong-Kil Lee*, Yoon-Seok Park**, June-Ho Lee***)

* 안동대학교 기계교육과, ** (주)대한트랜스, *** 호서대학교 전기공학부
(접수일자: 2002년 2월 14일; 수정일자: 2002년 6월 20일; 채택일자: 2002년 7월 3일)

본 논문에서는 전력설비의 열화로 발생하는 부분방전 음압 검출을 위해 간섭계형 광섬유 센서를 제작하고 방전 음압을 측정하였다. 광섬유 센서는 아크릴과 알루미늄에 광섬유를 수회 감은 맨드릴형으로 선택하였으며, 간섭계는 Sagnac 간섭계 및 Mach-Zehnder 간섭계를 선택하여 실험하였다. 피에조(PZT)를 이용하여 구성된 광섬유 간섭계의 적합성을 확인하였다. 방전 음압 발생장치는 절연유 내에 방전 모의셀을 설치하여 방전 음압을 발생시키고, 광섬유 센서로 방전신호를 검출하였다. 실험결과 Sagnac 간섭계가 Mach-Zehnder 간섭계보다 방전 음압을 보다 안정적으로 검출함을 확인하였으며, Sagnac 간섭계 센서가 방전 음압 검출에 적합함을 확인하였다.

핵심용어: 광섬유 센서, 광섬유 간섭계, 방전음압, 맨드릴, 피에조

투고분야: 물리음향 및 광음향 분야 (9.7)

In this paper, it was manufactured an interferometric optical fiber sensor and measured partial discharge acoustic signal caused by defect of power facilities such as power cables, transformers and gas insulation. Acrylic and aluminium mandrels wound with fiber-optic were chosen as optical fiber sensor. Sagnac and Mach-Zehnder interferometers were chosen to detect discharge acoustic signals. The two fiber optic interferometers were identified by using the PZT. Discharge experimentation set in the discharge imitation cell in oil tank and the discharge phenomena was generated. Based on the experimental result, to detect the discharge acoustic signal, Sagnac interferometer can detect stably the acoustic signal than the Mach-Zehnder interferometer. It is shown that Sagnac optical fiber sensor can detect the discharge acoustic signals effectively.

Keywords: Fiber optic sensor, Interferometer, Partial discharge, Mandrel, PZT

ASK subject classification: Physical acoustics and photo-acoustics (9.7)

1. 서론

부분 방전은 전력기기의 절연상태에 대한 정보를 외부로 전달해 주는 중요한 물리량 중 하나이기 때문에 전력설비의 진단에 부분방전의 측정기법이 널리 이용되고 있다[1-3]. 부분방전으로 발생하는 음압의 측정방법으로는 통상 압전재료로 만들어진 초음파 센서를 이용하는데

이 방법은 전자기 간섭(EMI)이나 전기적 잡음의 영향을 받지 않고 자석식 고정장치를 이용하여 원하는 부위에 설치가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 부분방전에 의해 발생한 음향신호는 초음파 센서에 전달되는 과정에서 매질이나 절연구조물 등에 의해 감쇠되기 때문에 센서에서 먼 거리의 부분방전 신호를 검출하기 어렵다. 또한 음향 신호가 전달되는 과정에서도 방전 발생원에서 직접 전달되는 신호와 금속벽과 같은 다른 매질을 통하여 간접적으로 전달되는 신호가 중첩되는 경우 방전 크기나 위치 검출이 어려워질 수 있다[2-4].

책임저자: 이종길 (jlee@andong.ac.kr)
760-749 경북 안동시 송천동 388
안동대학교 기계교육과
(전화: 054-820-5487; 팩스: 054-823-1766)

이러한 단점을 보완하기 위하여 광섬유 센서를 이용한 부분 방전 측정 기법이 도입되었다[2-5]. 광섬유 (fiber optic)를 이용한 센서 기술은 최근에 신호처리 및 다중화 (multiplexing) 기술의 발전과 함께 음향, 제축, 기계 및 항공 등의 다양한 분야에서 활발히 응용이 되고 있다. 또한 음향 센서로서 광섬유 하이드로폰 (hydrophone)은 별도의 전자장비 없이 원하는 신호를 높은 감도로 감지할 수 있는 이점 때문에 미국 및 유럽 등지에서 매우 적극적으로 연구되고 있다[6-7].

전력케이블, GIS (Gas Insulated Switchgear) 변압기 등과 같은 전력기기에서 발생하는 부분방전 음압을 정확히 측정하고 이를 올바르게 해석하는 작업은 신뢰성 있는 진단법을 개발하고 이를 현장에 적용하는데 있어 대단히

중요한 과제이다. 부분 방전 측정을 광섬유 센서로 이용한 기존의 연구[2-5]는 간섭계의 형태와 센서 맨드릴 (mandrel) 재질을 미리 선정하고 실험을 한 경우로서, 간섭계의 구성 형태를 통한 적합성은 검증하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 실리콘 절연유 내에 광섬유 센서를 제작 설치하고 실리콘 절연유 내에 부분방전 모의 셀을 설치하여 전압을 가할 때 발생하는 부분방전 음압 신호를 측정할 수 있는가에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 Sagnac 간섭계 및 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고 실험하였으며, 간섭계 형태를 통하여 광섬유 센서의 유용도에 대하여 고찰하였다.

본 연구를 위하여 그림 1과 같은 절차를 거쳐 실험을 하였다. 먼저 간섭계의 형태를 일반적으로 널리 쓰이는

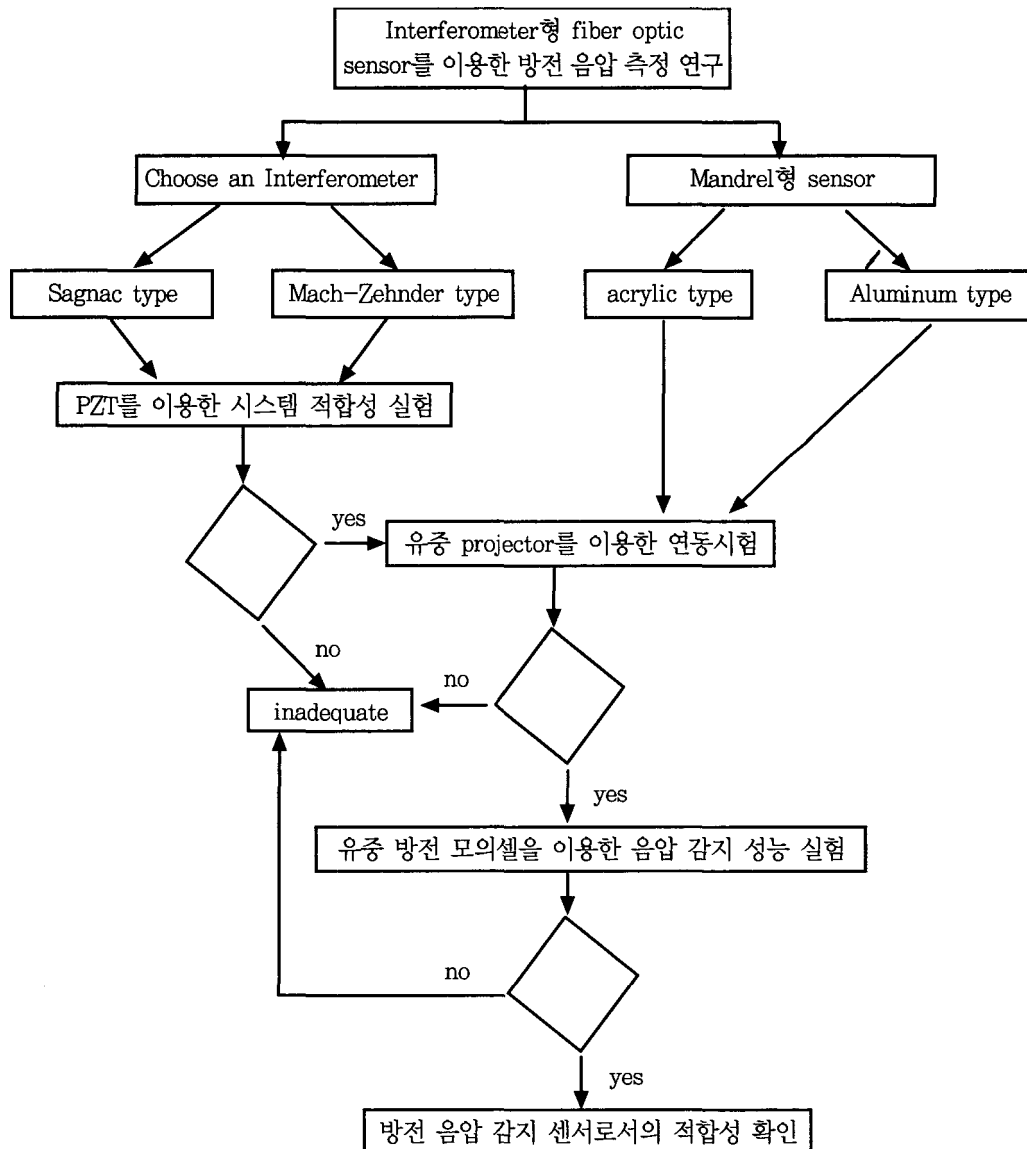


그림 1. 방전 음압 감지용 광섬유 간섭계 및 맨드릴형 센서의 선정 절차도

Fig. 1. Schematic diagram of experimental procedure for the detection of the discharge.

Sagnac과 Mach-Zehnder로 선정하고 두 개의 간섭계가 본 연구 목적에 적합한지를 피에조 및 실험을 통하여 확인하였다. 맨드릴형 센서로서는 맨드릴의 재료를 구하기 쉬운 재질인 아크릴과 알루미늄으로 선정하고 음압 감도가 높은 쪽을 선정하였다. 부분방전 측정에 맨드릴 재질로서 알루미늄을 적용한 것은 부분방전 발생장치에서 맨드릴이 충분히 떨어져 있어 적용상에는 문제가 없다. 센서의 형태로서의 맨드릴은 분포형 센서보다 감도가 뛰어난 것으로 알려져 있다[6-7]. 간섭계와 맨드릴형 센서의 연동 시험을 통하여 방전 발생시 음압을 감지하는지의 여부를 실험을 통하여 확인하였다.

II. Sagnac 간섭계의 원리

본 연구에 사용된 광섬유 간섭계는 Sagnac 간섭계와 Mach-Zehnder 간섭계이다. Sagnac 간섭계의 원리는 입사광을 둘로 쪼개고 서로 반대방향으로 광폐회로를 통과시킨 후, 간섭시키는 것으로서 이의 구성도를 그림 2에 보였다. 그림에서와 같이 레이저에서 나온 빛은 2×2 결합기(광분배기)를 거쳐 광섬유 루프를 서로 반대방향으로 진행하게 된다. 각 방향으로 진행되는 레이저 광은 측정하고자 하는 물리량에 의해 광섬유에 가해지는 변화에 상응

하는 광경로의 변화를 겪은 후 광분배기 (beam splitter)에서 다시 합쳐져 광검출기로 검출된다. 이때 각각의 광경로 차이에 비례하는 위상차가 발생하여 검출광의 세기에 변화가 일어나고 이를 측정함으로써 광섬유 센서에 가해진 피측정량의 크기를 검출하게 된다.

그림 2의 광섬유 루프에서 시계방향과 반시계 방향으로 진행하는 빛을 각각 A^R , A^L 이라 하고 이를 복소수로 표시할 수 있다. 그림과 같이 폐회로의 반경이 R 이고, 각속도가 Ω , 접선속도가 v , 파장이 λ , 광속도가 c 인 간섭계에 대하여 빛이 회전방향으로 통과하여 나가는데 소요되는 전체 시간은[5]

$$t_{sum}^+ = \frac{2\pi R}{c} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{v}{c}\right)^n\right) = \frac{2\pi R}{c} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{v}{c}\right)^n$$

$$= \frac{2\pi R}{c} \frac{1}{1 - v/c} \tag{1}$$

빛이 반대 방향으로 통과하는데 소요되는 전체 시간은 다음과 같다.

$$t_{sum}^- = \frac{2\pi R}{c} \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{v}{c}\right)^n\right)$$

$$= \frac{2\pi R}{c} \left(1 - \left(\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{v}{c}\right)^n - 1\right)\right) = \frac{2\pi R}{c} \left(2 - \frac{1}{1 - v/c}\right) \tag{2}$$

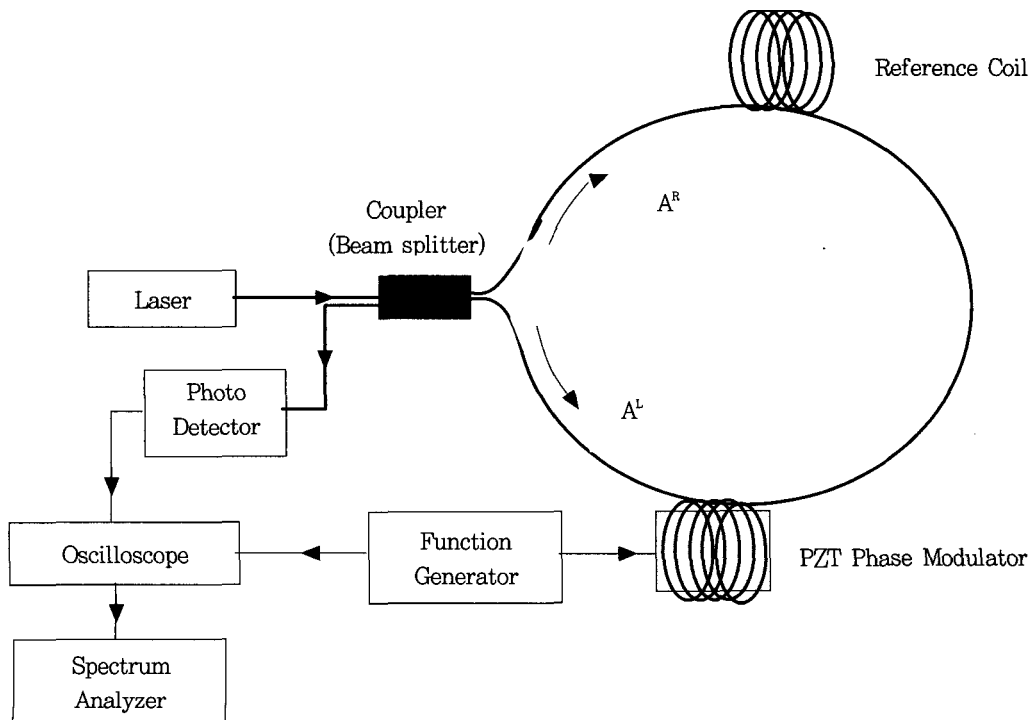


그림 2. 피에조로 구성된 Sagnac 간섭계
Fig. 2. Sagnac interferometer and PZT phase modulator.

그러므로 빛이 정방향과 반대방향으로 통과하는데 소요 되는 전체 시간의 차는

$$\begin{aligned} \Delta t_{sum} &= t_{sum}^+ - t_{sum}^- \\ &= \frac{2\pi R}{c} \frac{1}{1-v/c} - \frac{2\pi R}{c} \left(2 - \frac{1}{1-v/c}\right) \\ &= \frac{4\pi R}{c} \left(\frac{1}{1-v/c} - 1\right) = \frac{4\pi Rv}{c^2(1-v/c)} \\ &= \frac{4A}{c^2(1-v/c)} \Omega \end{aligned} \quad (3)$$

이며, $v \ll c$ 이 때에는 근사 관계식이 얻어진다. 단일 주파수인 빛의 주기가 $T = \lambda/c$ 이면, 광선의 줄무늬 변화는 $\Delta N = \Delta t_{sum}/T$ 이며, 회전에 의하여 영향을 받는 위상변화는

$$\begin{aligned} \Delta \phi &= 2\pi \Delta N \\ &= 2\pi \frac{\Delta t_{sum}}{T} \\ &= \frac{8\pi A \Omega c}{c^2 \lambda} = \frac{8\pi A}{c \lambda} \Omega \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 이 위상변화는 각속도 Ω 에 비례한다. 감도를 높이기 위하여 빛이 폐회로 주위를 여러 번 통과하도록 만든다. m배의 폐회로 루프에서는 위상변화가 m 배로 된다.

$$\Delta \phi = m \frac{8\pi A}{c \lambda} \Omega = \frac{4\pi LR}{\lambda c} \Omega \quad (5)$$

광섬유 간섭계를 설계할 때 위상변화는 $L = m \times 2\pi R$ 이고, $A = \pi R^2$ 이다. 식 (5)와 같이 간섭계의 위상변화는 광섬유의 길이 L과 구성반경 R에 비례하므로 감도를 높이기 위하여 간섭 길이를 길게 할 필요가 있으며, 본 실험에 사용된 광섬유 간섭계의 길이는 L=150 m이다. 따라서 이러한 Sagnac 간섭계의 위상변화를 이용하여 외부 부분방전 음압을 효과적으로 감지할 수 있다. 또한 광섬유 간섭계의 길이 L을 늘이면 이론적으로 부분방전 음압 측정감도는 향상되므로 이의 실험적 검증도 필요하다고 판단된다.

III. 간섭계의 구성 및 실험

반도체 레이저인 광원으로부터 나온 간섭성 빛이 렌즈에 의하여 편광유지 광섬유인 단일모드 광섬유에 입사된다. Mach-Zehnder 간섭계는 입사광을 센싱 암 (sensing arm)과 기준 암 (reference arm)의 두 경로를 통과시켜 광 결합기에서 두 개의 광을 간섭시켜 신호처리하는 것으로서, 이의 구성도를 그림 3에 보였다. 따라서 구성된 두 종류의 광섬유 간섭계가 음을 정확하게 감지하는지를 조사하기 위하여 간섭계의 경로상에 피에조를 연결하고 함수발생기를 이용하여 진동신호를 입력하였다.

피에조에는 광섬유가 수회 감긴 구조로서 맨드릴형 센서를 대체하기 이전에 모의실험을 하기 위한 것이다. 그림 2 및 3에서와 같이 함수발생기를 이용하여 피에조에 입력

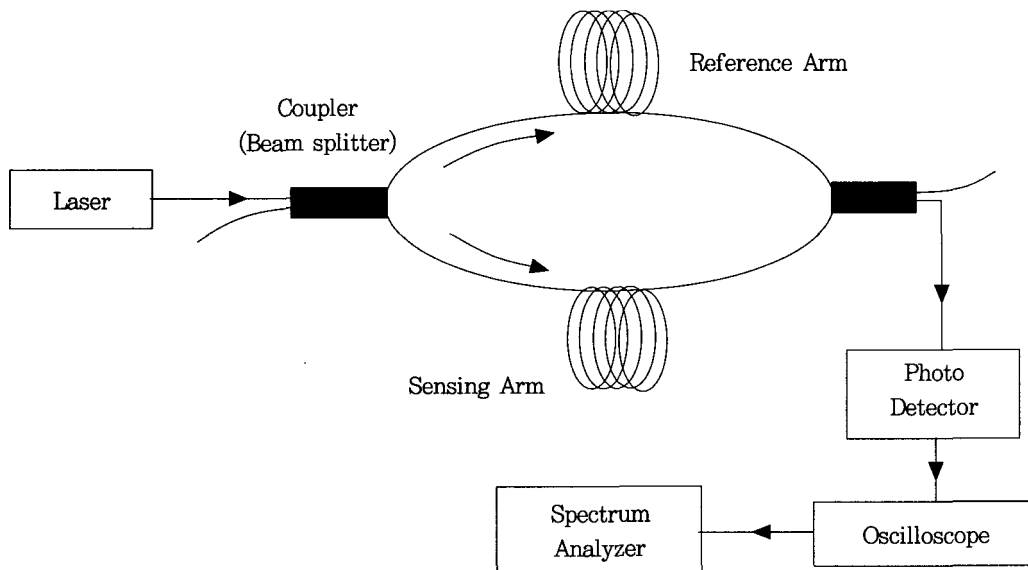


그림 3. Mach-Zehnder 간섭계
Fig. 3. Mach-Zehnder interferometer.

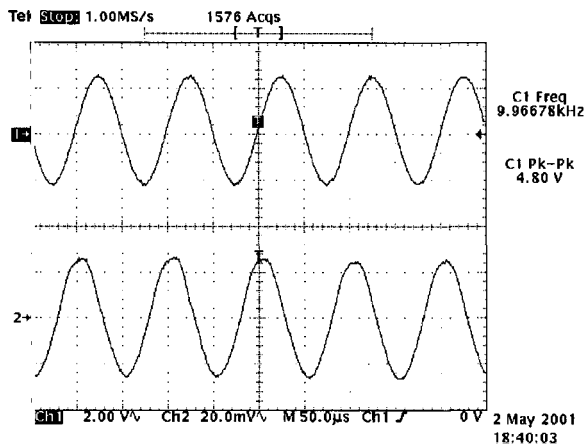


그림 4. 피에조에 인가된 정현신호와 Sagnac 간섭계의 광섬유센서의 검출 신호 (CH1: 피에조에 인가한 신호, CH2: 필터를 거친 광섬유 신호)

Fig. 4. PZT input signal and the signal detected by Sagnac interferometer.

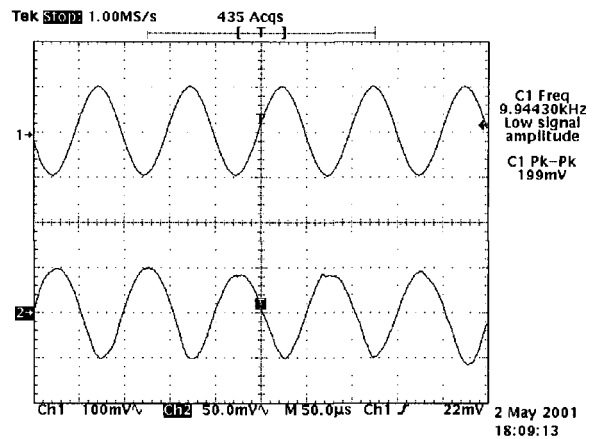


그림 5. 피에조에 인가한 정현신호와 Mach-Zehnder 간섭계의 광섬유센서의 검출 신호 (CH1: 피에조에 인가한 신호, CH2: 필터를 거친 광섬유 신호)

Fig. 5. PZT input signal and the signal detected by Mach-Zehnder interferometer.

전기가 들어오면 피에조는 진동을 하게 되며 이의 진동으로 인하여 광섬유가 길이 변형을 일으켜 경로차에 의한 신호가 감지된다. 레이저 광원은 파장 1550 nm의 레이저 다이오드를 사용하였다. 그림 2와 같이 Sagnac 간섭계는 레이저 다이오드에서 방출된 레이저 광(입사 광)이 2×2 광결합계를 통하여 Sagnac 간섭계의 루프로 입력된다. 또한 그림 3과 같이 Mach-Zehnder 간섭계는 레이저 다이오드에서 방출된 레이저 광이 1×2 광결합계를 지나 기준 압과 센서 압 (27 m)을 거쳐 2×2 광결합계로 입사된다.

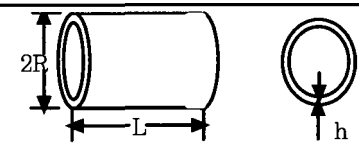
그림 4 및 5에는 구성된 Sagnac과 Mach-Zehnder형 간섭계에 센서 대응으로 피에조를 설치하고 피에조에 기지의 신호를 입력하여 검출된 출력을 보였다. 그림 4에서와 같이 피에조에 임의의 주파수인 10 kHz의 정현파 신호를 입력(CH1)하여 Sagnac 간섭계로부터 CH2의 출력신호를 얻었다. 그림 5와 같이 10 kHz의 정현파 신호를 입력(CH1)하여 Mach-Zehnder 간섭계로부터 CH2의 출력신호를 얻었다. 그림 4 및 5와 같이 검출된 광섬유 신호 주파수가 피에조에 인가한 신호와 거의 일치하고 있다. 즉, 간섭계를 통하여 출력된 신호와 함수 발생기에서의 직접 신호는 위상과 진폭의 차이를 당연히 가지고 있으며, 본 실험에서 얻고자 하는 주파수의 일치성이 검증되어 이 결과로부터 구성된 두 개의 광섬유 간섭계가 정상적으로 작동함을 확인할 수 있다.

이러한 피에조를 이용한 간섭계의 신호검출 검증 시험은 향후 광섬유 음향 센서의 개발에 유용하게 쓰일 수 있다. 또한 검출 음향의 주파수 대역을 알고 있으면, 피에조에 입력되는 함수발생기에서의 입력 주파수를 검출 주파수 대역에 맞게 설계하여 실험할 수 있는 이점이 있다고 판단된다.

IV. 방전 음압 검출 실험 및 결과

맨드릴형 광섬유 센서는 일반적으로 맨드릴에 감지 않은 형태의 센서보다 감도가 좋기 때문에 대부분의 수증음향 센서로서 많이 사용된다[6-7]. 본 실험에 사용된 센서는 아크릴과 알루미늄 원통에 광섬유를 수회 감은 형태를 이용하였다. 맨드릴은 길이가 L=5cm이고, 반경, R=2.4 cm, 두께가 4 mm인 중공 원통 (hollow cylinder)형이다. 맨드릴의 고유 진동수는 표 1과 같이 계산되며 이때 밀도, $\mu=2,700\text{kg/m}^3$, 영율 (Young's modulus) $E=7.1 \times 10^{10}\text{ Pa}$, 푸아송 비 $\nu=0.33$, $h=0.004\text{ m}$ 이다. 표 1에서와 같이 맨드릴의 고유진동수는 비틀 모드 (torsional mode)=36.26 kHz, 축 모드 (axial mode)=51.3 kHz, 반경 모드 (radial mode)=36.02 kHz로 구해진다. 이것은 맨드릴의 기본 고유진동수 (fundamental natural frequency)가 10 kHz보

표 1. 알루미늄 맨드릴의 모드에 따른 고유진동수
Table 1. Natural frequency of the aluminum mandrel.

Natural frequency		$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{2\pi R} \left[\frac{E}{\mu(1-\nu^2)} \right]^{1/2}$ (for $j=1,2,3,\dots$)
Torsional mode	$\lambda_{ij} = \frac{(1-\nu^2)^{1/2}}{\sqrt{2}} \frac{j\pi R}{L}$	36.26 kHz
Axial mode	$\lambda_{ij} = j\pi(1-\nu^2)^{1/2} \frac{R}{L}$	51.3 kHz
Radial mode	$\lambda_{ij} = 1$ (for $j=1, 2, 3, \dots$)	36.02 kHz

다 높기 때문에 부분 방전 음압이 10 kHz 이하인 경우에 대하여 평탄한 감도특성을 가지고 있음을 의미한다.

먼저 절연유에서 광섬유 맨드릴형 센서가 음파신호를 제대로 검출하는지를 확인하기 위해서 절연된 프로젝터를 유중 속에 넣어 음파 신호를 발생시켜 실험하였다. 본 실험에 사용된 절연유는 실리콘유로서 100 cst인 시료를 사용하였고 프로젝터에서 인가된 입력신호는 5 kHz의 정현신호를 인가하였다. 실험에 사용된 아크릴 맨드릴형 광섬유 센서에 감은 광섬유의 길이는 34 m (16 m는 연결 길이)이고, 기준 압의 광섬유의 길이는 50 m이다. 각 간섭계의 신호는 외부 환경에 민감하고 광신호 잡음이 있어 광 감지기 (Photo detector) 뒷단에 저역통과 필터를 설치하였고, Mach-Zehnder, Sagnac 간섭계 모두 부분방전

신호가 10 kHz 이하이므로 50 kHz의 차단 주파수를 가진 필터를 적용하여 신호를 검출하였다.

그림 6은 5 kHz의 프로젝트 입력신호를 Sagnac 간섭계가 유중에서 감지한 것을 보인 것이다. CH1은 그림 11에 서와 같이 설치된 초음파 센서가 잡은 신호이며, CH2는 프로젝트의 입력신호, CH3는 광섬유 센서가 잡은 신호이다. 그림 7은 CH3의 신호를 주파수 스펙트럼으로 본 것으로 입력 주파수 5 kHz를 그대로 복원함을 알 수 있다. 그림 8은 5 kHz의 프로젝트 입력신호를 Mach-Zehnder 간섭계가 유중에서 감지한 것을 보인 것이다. CH1은 초음파 센서 신호이며, CH2는 프로젝트의 입력신호, CH3는 광섬유 센서가 잡은 신호이다. 그림 9는 CH3의 신호를 주파수 스펙트럼으로 본 것으로 그림 7의 결과와 같이

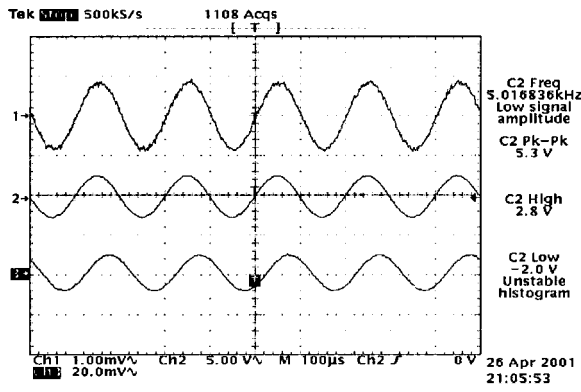


그림 6. 절연된 프로젝터 입력신호와 Sagnac 간섭계와 초음파 센서에서 검출된 신호 (CH1 : 초음파 센서 신호, CH2 : 입력신호, CH3 : 광섬유 센서 신호)

Fig. 6. An input signal of insulated projector and the signals detected by Sagnac interferometer and AE sensor.

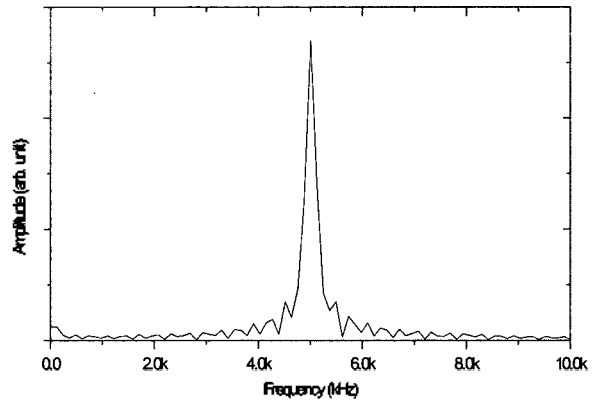


그림 7. Sagnac 간섭계에서 맨드릴이 감지한 신호에 대한 주파수 스펙트럼

Fig. 7. Frequency spectrum of the detected signal by mandrel of the Sagnac interferometer.

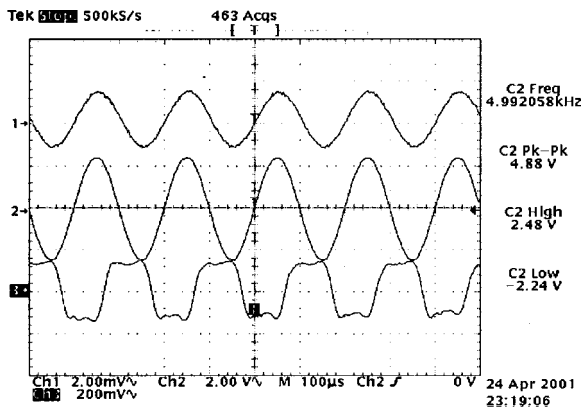


그림 8. 절연된 프로젝터에 인가한 입력 신호와 Mach-Zehnder 간섭계와 초음파 센서에서 검출된 신호 (CH1 : 초음파 센서 신호, CH2 : 입력신호, CH3 : 광섬유 센서 신호)

Fig. 8. An input signal of the insulated projector and the detected signal by Mach-Zehnder interferometer and AE sensor.

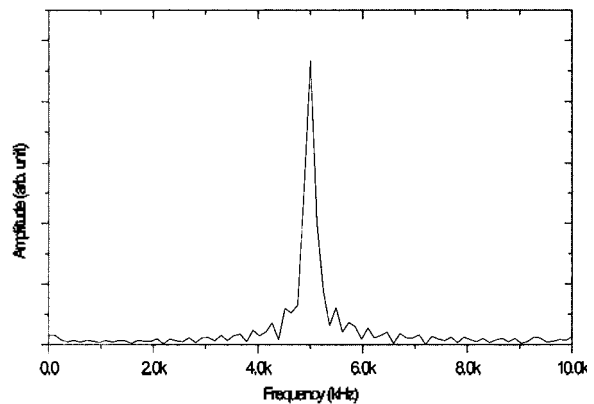


그림 9. Mach-zehnder 간섭계 맨드릴에서 감지한 신호에 대한 주파수 스펙트럼 분석

Fig. 9. Frequency spectrum of the detected signal by Mach-Zehnder interferometer.

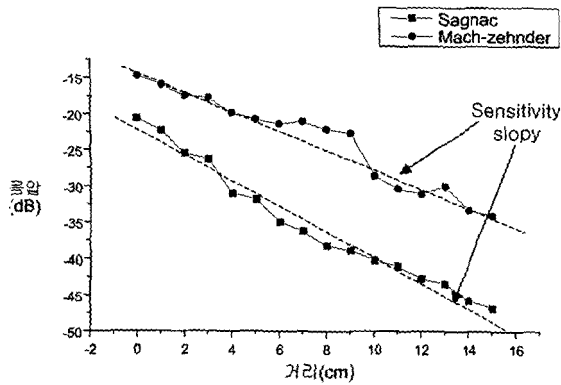


그림 10. 간섭계별 절연유 속에서의 음압 감지 특성
Fig. 10. Sound detection characteristics of the two interferometers in the insulation oil.

입력 주파수 5 kHz를 그대로 복원함을 알 수 있다. 따라서 5 kHz의 프로젝트 입력신호를 Sagnac 간섭계는 초음파 센서와 같이 유중에서 잘 감지함을 확인할 수 있다. 그러나 Mach-Zehnder 간섭계는 그림 8에서와 같이 다소 왜곡된 신호를 감지하여 Sagnac 간섭계와는 차이를 보였다. 이는 본 실험에 구성된 Mach-Zehnder 간섭계의 특

정으로 보이며, 그림 6과 그림 8의 결과에 근거하여 유중에서의 음압 감지에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 그림 10에는 간섭계별로 측정된 음압 감지 성능을 프로젝트에서 떨어진 거리별 (0~15 cm)로 보인 것이다. 그림에서와 같이 음압 감지 성능은 Sagnac 간섭계와 Mach-Zehnder 간섭계가 비슷한 특성을 보였다. 그림 10에 점선으로 표시된 두 직선의 감도 기울기 (sensitivity slope)는 대체로 동일하게 보이며, 별다른 특성 차이를 발견할 수 없었다. 따라서 프로젝트 실험결과에 근거한 두 간섭계의 감도 우수성을 단순 판별하기는 어려울 것으로 보인다.

방전 실험은 그림 11과 같이 실험을 구성하였고 방전 모의 셀은 그림 12와 같이 평판 대 평판으로 평판 간극이 약 0.5 mm~1 mm 정도 되도록 조정하여 부분 방전이 일어나도록 유도하였다. Laser Diode는 1550 nm를 사용하였다. 광섬유 맨드릴은 아크릴릭 맨드릴과 알루미늄 맨드릴 2가지 종류를 사용하여 각각 실험하였다. Sagnac 간섭계에 사용된 광섬유 총 길이는 약 150 m 정도이고 맨드릴에 감은 광섬유의 길이는 아크릴 및 알루미늄 모두 약 34 m 정도이다.

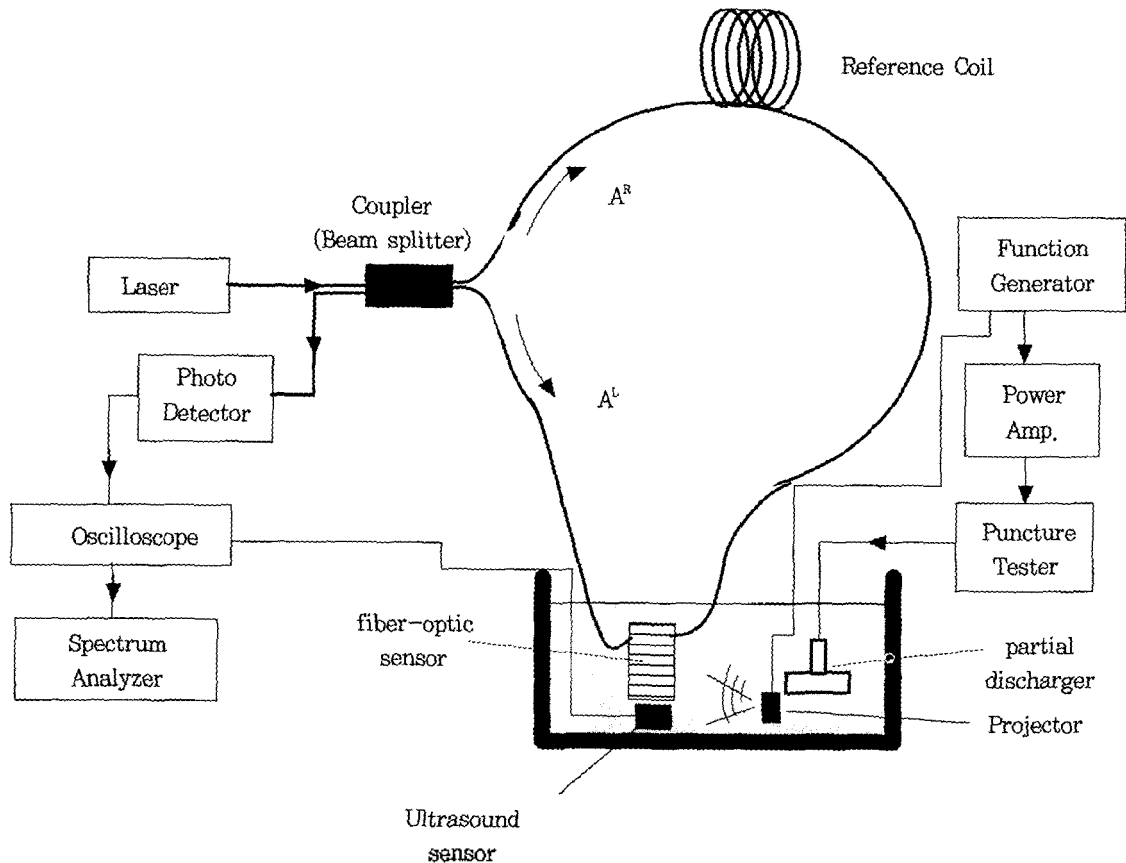


그림 11. 부분방전 신호 측정을 위한 Sagnac 간섭계 실험 구성도
Fig. 11. Experimental set up of the Sagnac interferometer for the measurement of partial discharge.



그림 12. 부분방전 측정 실험장치 구성 사진
Fig. 12. Experimental set up for the partial discharge.

부분방전이 발생하는 방전모의 셀은 유조 안에 설치되었고 인가 전압은 함수발생기에서 나오는 신호를 증폭시켜 상용전원 110V 60 Hz의 신호를 방전 발생기 (Puncture Tester)로 인가시켰다. 그리고 인가된 신호는 다시 방전 발생기를 통해 약 6kV의 고전압으로 증폭시켜 방전모의 셀로 인가시켰다. 방전모의 셀 사이에는 약 0.5 mm의 시

료를 두어 부분방전을 일으켜 신호 검출을 하였다.

그림 13 및 14에는 아크릴 맨드릴과 알루미늄 맨드릴에서 감지된 신호를 보인 것으로 구성된 Sagnac 간섭계는 방전 음압을 안정적으로 감지함을 확인할 수 있다. 그러나 그림 15와 16의 주파수 스펙트럼 분석에서와 같이 알루미늄 맨드릴이 상대적으로 아크릴 맨드릴보다 음향 감지 성능이 우수함을 알 수 있다. 이론적으로 맨드릴형 광섬유 센서의 감도는 탄성계수 값에 반비례한다[6].

그러나 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 방전 음압모의 실험을 수행하였으나 이 간섭계는 방전 음압을 효과적으로 감지하지 못하여 본 논문에서는 그 결과를 보이지 않았다. Mach-Zehnder형 간섭계는 다소 왜곡된 신호를 검출하였으며, 검출된 신호도 아주 미약하였다 그 원인은 본 실험의 결과로는 알 수 없었다. 단지 두 간섭계의 감지성능 차이는 대상 음압과 전달 매질 (수중, 유중, 공기중)이 무엇인지에 따라 다소 다른 특성이 있는 것으로

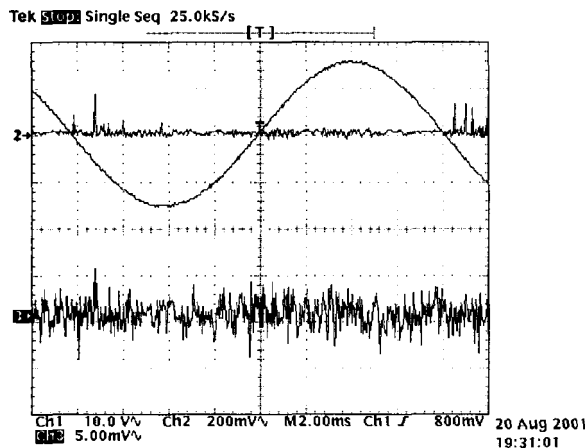


그림 13. 아크릴 맨드릴에서 잡은 방전 신호
Fig. 13. PD signal detected by acrylic mandrel.

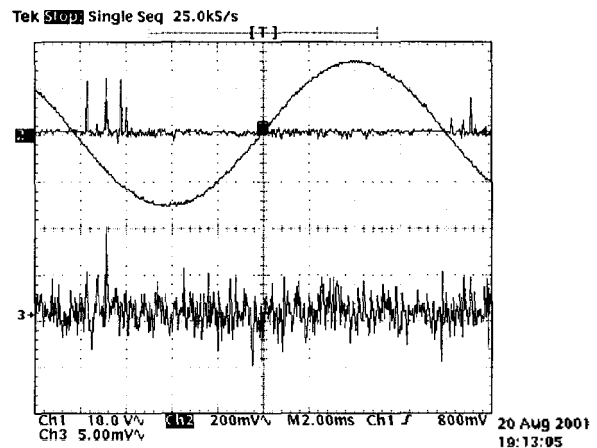


그림 14. 알루미늄 맨드릴에서 잡은 방전 신호
Fig. 14. PD signal detected by aluminium mandrel.

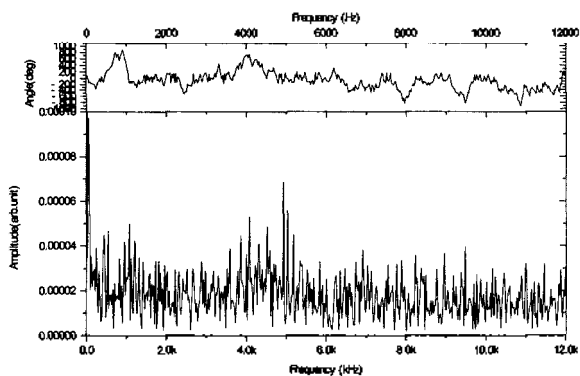


그림 15. 아크릴 맨드릴에서 감지한 신호에 대한 주파수 스펙트럼 분석
Fig. 15. Frequency spectrum of the signal by acrylic mandrel.

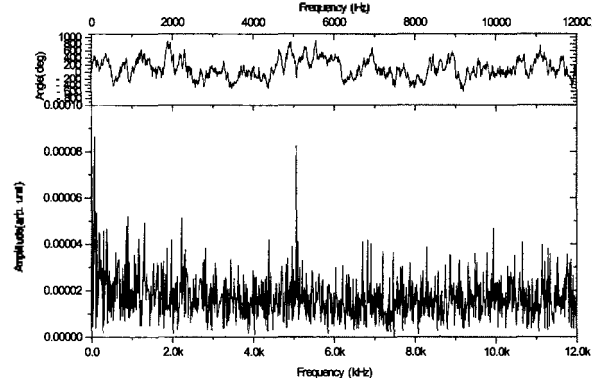


그림 16. 알루미늄 맨드릴에서 감지한 신호에 대한 주파수 스펙트럼 분석
Fig. 16. Frequency spectrum analysis of the signal detected by aluminium mandrel.

판단된다[7]. 이상의 실험을 통하여 Sagnac 간섭계가 상대적으로 Mach-Zehnder 간섭계보다는 방전 음압 측정에 효과적임을 알 수 있었으며, 알루미늄 맨드릴이 상대적으로 아크릴 맨드릴보다 방전 음압 측정 감도가 높음을 알 수 있었다.

이는 전력케이블, GIS 변압기 등과 같은 전력기기에서 발생하는 부분방전 음압을 정확히 측정하고 이를 올바르게 해석하는 작업을 기존의 초음파 센서에서 광섬유 센서로 대체할 수 있음을 의미하는 것으로 판단되며, 향후 보다 실용적인 데이터를 얻기 위하여 측정에 어려움이 있기는 하지만 실제 변압기 속에서의 방전 음압 측정이 이루어져야 하고, 이를 토대로 보다 신뢰성 있는 광섬유 센서의 감도 측정이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 실리콘 절연유 내에 부분방전 모의 셀을 설치하여 전압을 가할 때 발생하는 음압 신호를 간섭계형 광섬유 센서를 이용하여 측정하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Sagnac 및 Mach-Zehnder형 간섭계에 위상 변조기 (Phase Modulator)를 설치하여 출력 신호를 관찰하였다. 구성된 두 간섭계는 임의 신호인 10 kHz의 정현파 입력 신호를 왜곡없이 잘 검출하였다.
2. 절연유 속에 알루미늄형 맨드릴 센서를 삽입하고 프로젝터 (projector)를 이용하여 부분 방전 주파수와 동일한 5 kHz의 음파를 발생시켜 각 간섭계별로 검출된 출력신호를 비교하였다. Sagnac 간섭계는 프로젝터 신호를 잘 감지하였으나 Mach-Zehnder형은 다소 왜곡된 신호를 복원하여 적합하지 않음을 확인하였다.
3. 평판 간극이 0.5 mm인 평판 대 평판 (plane to plane)을 이용하여 5 kHz의 부분방전 음압을 발생시켰으며, Sagnac 간섭계는 부분방전 음압 신호를 잘 검출하였다. 그러나 Mach-Zehnder형 간섭계는 상대적으로 검출 신호의 진폭이 매우 미약하고 불안정하여 분석할 수 없었다.

전력케이블, 변압기 GIS 등과 같은 전력기기에서 발생하는 부분방전 음압을 정확히 측정하고 이를 올바르게 해석하는 작업은 신뢰성 있는 진단법을 개발하고 이를 현장

에 적용하는데 있어 중요한 과제이다. 본 실험을 통해 Sagnac 간섭계는 부분방전 음압 신호를 잘 검출하여 효과적인 광섬유 센서임을 확인하였다. 따라서 Sagnac 간섭계는 실제 변압기에서 자주 발생하는 부분방전 현상을 찾는 데 그 적용성이 뛰어날 것으로 판단된다. 그러나 Mach-Zehnder형 간섭계는 다소 왜곡된 신호를 검출하였으며, 검출된 신호도 아주 미약하였으나 그 원인은 본 실험의 결과로는 알 수 없었다. 단지 두 간섭계의 감지성능 차이는 대상 음압과 전달 매질 (수중, 유중, 공기중)이 무엇인지에 따라 다소 다른 특성이 있는 것으로 판단된다[7]. 따라서 대상 음압에 따른 Mach-Zehnder 간섭계의 신호 검출의 왜곡화 및 안정화 기법에 대한 연구가 향후 필요할 것으로 보인다. 또한 광섬유 간섭계의 길이를 길게 하면 부분방전 음압 측정감도는 향상되므로 이의 실험적 검증도 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구 (관리번호: 00-역-02)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소의 주관으로 수행되었음.

참고 문헌

1. H.-R. Kwak, J.-C. Kim and S.-J. Hwang, "Detection and location of partial discharge in transformers," *Journal of KIEE*, 295-301, 1992.
2. T.-T. Kim, J.-H. Nam and K.-S. Suh, "Measurement of discharging signal and its attenuation in insulation oils by an optical fiber sensor," *Journal of KIEEME*, 1198-1206, 1999.
3. A. Zargari and T. R. Blackburn, "Modified optical fiber sensor for PD detection in high voltage power equipment," *Conf. record of 1996 IEEE ISEI*, 1, 424-427, 1996.
4. 이종길, 이준호, 김상준, "Sagnac 간섭계를 이용한 유중방전 신호 검출," *대한전기학회논문지*, 622-626, 1999.
5. 김상준, "광섬유 Sagnac 간섭계를 이용한 방전현상 검출," 고려대학교 박사학위 논문, 2000.
6. 이종길, 윤형규, 서안창, "끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석," *한국소음진동공학회지*, 6 (4), 475-479, 1996.
7. 이종길, "2개의 광섬유 청음기 배열의 수중음향 감지특성 연구," *한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집*, 664-668, 1999.

저자 약력

● 이 종 길 (Jong-Kil Lee)



1984년 2월: 부산대학교 기계공학과(학사)
1990년 12월: 미) University of Utah, Mechanical Engineering (석사)
1993년 8월: 미) University of Utah, Mechanical Engineering (박사)
1984년 3월~1989년 8월: 국방과학연구소 연구원
1989년 9월~1994년 1월: Research Associate, Univ. of Utah
1995년 1월~1998년 2월: 국방과학연구소 선임연구원
1998년 3월~현재: 인동대학교 기계교육과 교수

● 박 윤 석 (Yoon-Seok Park)

2000년 2월: 호서대학교 전기공학과 (학사)
2002년 2월: 호서대학교 대학원 전기공학과 (석사)
2002년 4월~현재: (주)대한트렌스 연구개발부 주임

● 이 준 호 (June-Ho Lee)



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (학사)
1987년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학과 (석사)
1992년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학과 (박사)
1993년~1994년 일본전력중앙연구소 초빙연구원
1995년~현재: 호서대학교 전기공학부 교수