

Discharge Signal Detection in Insulating Oil using the Optial Fiber Sagnac Interferometer

李 鍾 吉\* · 李 峻 昊\*\* · 金 相 俊\*\*\*  
(Jongkil Lee · June-Ho Lee · Sang-Joon Kim)

**Abstract** - In this paper, an optical fiber sensor(OF sensor) utilizing the principal of Sagnac interferometer was proposed to detect the discharge signals. The needle-sphere electrode system in insulating oil generated the signals. The performance of OF sensor was checked by sinusoidal calibration signal generated by PZT actuator at 198kHz. The detected discharge signals consisted of acoustic signal and the electrical noise. The noise signal could be removed by digital low pass filter. It was demonstrated that the OF sensor in this research had a possibility to detect the discharge signals in power apparatus.

**Key Words** : optical fiber sensor, Sagnac interferometer, discharge signal, FFT, digital filter

1. 서 론

부분방전은 전력기기의 절연상태에 대한 정보를 외부로 전달해주는 중요한 물리량 중 하나이기 때문에 전력설비의 진단에 부분방전의 측정방법이 널리 이용되고 있다[1]. 이러한 부분방전의 측정방법은 크게 전기적인 방법과 비전기적인 방법으로 나눌 수 있는데, 전기적인 방법은 부분방전이 발생하면서 나타나는 전류펄스를 측정임피던스나 CT(current transformer)와 같은 전기적 측정장치를 사용하여 검출하는 방법으로 대부분의 전력기에 가장 널리 응용되고 있다[2, 3]. 비전기적인 방법은 부분방전이 일어나면서 에너지의 소모에 의해 발생하는 빛, 음향, 열, 가스 등을 측정하여 부분방전을 검출하는 방법으로 이중 부분방전에 수반되는 음향신호 측정방법은 전력용 변압기나 GIS 등에 응용하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다[4, 5, 6, 7].

음향신호 측정방법에서는 통상 압전재료로 만들어진 초음파센서를 이용하는데 이 방법은 EMI나 전기적 잡음의 영향을 받지않고 자석식 고정장치를 이용하여 원하는 부위에 설치가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 부분방전에 의해 발생하는 음향신호는 초음파센서에 도달하는 과정에서 매질이나 절연구조물 등에 의해 감쇠되기 때문에 센서로부터 먼 거리의 부분방전신호를 검출하기 어렵다. 또한 음향신호가 전달되는 과정에서도 방전발생원으로부터 직접 전달

되는 신호와 금속벽과 같은 다른 매질을 통하여 간접적으로 전달되는 신호가 중첩되는 경우 방전크기나 위치검출이 어려워질 수 있다.

최근 들어 광섬유를 이용한 센서의 응용이 여러 분야에서 활발히 이루어지고 있다. 센서로서의 광섬유는 광대역성, 저손실성, 소형경량, 상호불간섭성, 무유도성, 방폭성, 높은 절연내력, 높은 내부식성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 전력기기와 관련된 물리량의 측정에도 탁월한 가능성을 가진 센서이다[8].

고전압분야의 방전현상 측정에 광섬유 센서를 이용한 연구는 1990년대 들어서야 시작되었기 때문에 국내외에서 발표된 연구가 대단히 적은 실정이다. 그 중 국제적인 학술대회에 발표된 경우는 호주의 T. R. Blackburn 교수 연구팀의 연구로 헤테로다인(heterodyne) 방식을 적용한 Michelson 간섭계(interferometer)를 이용하여 모의변압기 탱크내에서의 방전신호를 측정하여 기존의 압전소자를 이용한 초음파센서와의 성능비교를 하였다. 그 결과 적절히 설계되어 장치된 광섬유센서의 측정결과가 감도면에서 초음파센서보다 우수하다고 발표한바 있다[9]. 그러나 이 팀이 개발한 센서시스템의 경우 He-Ne 레이저를 사용함으로 인하여 레이저광의 적절한 정렬(alignment)에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 약간의 외부적 충격이나 이동이 있어도 교정을 다시하여야 하는 어려움이 있다. 또한 80MHz 정도의 높은 주파수를 가지는 광을 변조(modulation)하고 다시 복조하기 위한 고가의 Bragg cell 과 복조기가 필수적이기 때문에 아직 실용을 위해 해결해야 할 많은 과제를 안고 있다.

본 연구에서는 절연유 내에서 발생하는 방전신호를 Sagnac 간섭계의 원리를 이용하여 자체 제작한 광섬유센서 시스템으로 신호처리방법을 적용하여 잡음감소를 구현함으로써 광섬유센서를 이용한 전력기기의 방전신호검출의 응용

\* 正 會 員 : 安東大 機械工學教育科 助教授 · 工博  
 \*\* 正 會 員 : 湖西大 電氣工學部 副教授 · 工博  
 \*\*\* 正 會 員 : 韓電 電力研究院 電氣利用技術그룸장 · 工博  
 接受日字 : 2000年 6月 18日  
 最終完了 : 2000年 10月 26日

가능성과 앞으로의 개선점에 대하여 고찰하였다.

### 2. 측정원리

광섬유는 전송할 수 있는 파장의 수에 따라 단일모드(single mode)와 다중모드(multi mode) 섬유로 구분할 수 있다. 그리고 광섬유를 이용한 센서로는, 광섬유가 단지 측정부위까지 빛을 전달하고 다시 광검출기까지 돌아오는 경로로써의 역할만을 하는 extrinsic 센서와 광섬유 자체가 피측정량(measurand)에 의해 직접적으로 영향을 받는 센서 역할을 하는 intrinsic 센서형으로 구분할 수 있다. 통상 extrinsic 센서에는 다중모드섬유를 사용하고 intrinsic 센서에는 다중과 단일모드섬유를 모두 사용한다. 또한 다중모드 센서의 경우는 전달되는 빛의 세기가 피측정량에 의해 변화하는 반면, 단일모드 센서의 경우는 외부로부터의 변화가 광섬유를 통과하는 빛의 위상에 영향을 미치게 된다. 또한 광섬유를 통과하는 빛의 변조(modulation)방식에 따라 빛의 세기, 위상, 주파수, 파장, 편광 변조 등으로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 절연유 내의 부분방전에 의해 발생하여 전달되는 음향신호검출을 위하여 높은 측정감도를 특징으로 하는 단일모드 광섬유를 이용한 간섭계(interferometer)를 이용하였다. 광섬유내를 통과하는 빛은 음향의 압력에 의해 위상이 변조되게 된다[10].

간섭계로는 Michelson, Mach-Zehnder, Sagnac, Fabry-Perot 간섭계 등이 널리 사용되는데 본 연구에서는 호모다인(homodine)방식의 Sagnac 간섭계를 이용하였다. 그림 1은 광섬유를 이용한 Sagnac 간섭계의 간단한 구성도이다.

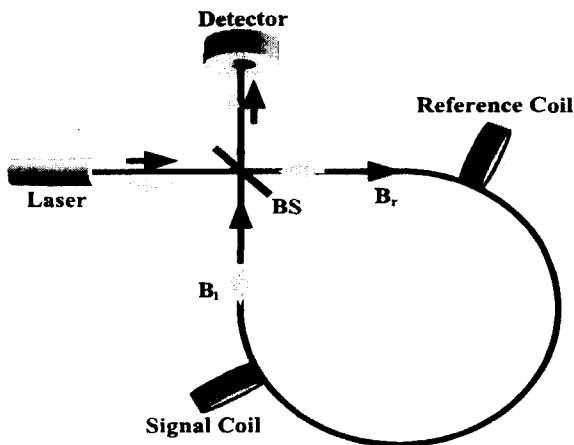


그림 1 광섬유를 이용한 Sagnac 간섭계의 구성도  
Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber Sagnac interferometer

그림 1에서와 같이 레이저에서 나온 빛은 beam splitter를 거쳐 광섬유 루프(loop)를 서로 반대방향으로 진행하게 된다. 각 방향으로 진행되는 레이저광은 측정하고자 하는 물리량

에 의해 광섬유에 가해지는 변화에 상응하는 광경로의 변화를 겪은 후 beam splitter에서 다시 합쳐져 광검출기로 검출된다. 이때 각각의 광경로차이에 비례하는 위상차가 발생하여 검출광의 세기에 변화가 일어나고 이를 측정함으로써 광섬유센서에 가해진 피측정량의 크기를 검출하게 된다.

우선 그림 1의 광섬유루프에서 시계방향과 반시계방향으로 진행되는 빛을 각각  $B_r$ ,  $B_l$  이라 하고 이를 다음과 같이 복소수로 표시할 수 있다.

$$B_r = A \exp[j \omega_L t + 2\beta x_r] \tag{1-1}$$

$$B_l = A \exp[j \omega_L t + 2\beta x_l] \tag{1-2}$$

여기서  $A$ 는 beam splitter에서 각 방향으로 빛이 1:1로 분리된다고 가정하였을 때 각 방향의 빛의 크기이고,  $\omega_L$ 은 레이저광의 각주파  $x_r$ 와  $x_l$ 은 각각 시계방향과 반시계방향으로 진행되는 빛의 경로길이이며,  $\beta$ 는 위상전달상수(phase propagation constant)로 다음 식(2)와 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \tag{2}$$

여기서  $n$ 은 광섬유 코어의 굴절율이고  $\lambda_0$ 는 자유공간(free space)에서 레이저광의 파장이다. 두 빛은 다시 합쳐져 광검출기로 들어가는데 이 때 빛의 세기  $I_d(t)$ 는 다음 식(3)으로 표현된다[11].

$$I_d = 2 A^2 [1 + \cos \varphi(t)] \tag{3}$$

여기서  $\varphi(t)$ 는 서로 반대방향으로 진행한 두 빛  $B_r$ ,  $B_l$  사이의 상대적 위상차이며 시변함수로 다음과 같이 주어진다.

$$\varphi(t) = 2\beta |x_r(t) - x_l(t)| \tag{4}$$

위 식(4)에서 주어진 바와 같이 피측정량은, 본 연구의 경우, 유증방전에 의해 발생한 음향신호의 압력의 영향을 받은 광섬유 루프의 변화로 각 빛의 경로길이  $x_r(t)$ 과  $x_l(t)$ 가 변화하고 이는 위상차  $\varphi(t)$ 의 변화로 반영되어 최종적으로 빛의 세기  $I_d(t)$ 가 변화하게 된다. 따라서 이 빛의 세기의 시간적 변화를 측정함으로써 피측정량의 변화를 알 수 있게된다.

### 3. 실험

그림 2는 본 연구를 위해 구성한 Sagnac 간섭계의 구성도이다. 그림에서와 같이 3×3 coupler를 지난 광은 둘로 나누어지며, 유증방전 장치 내에 음파가 발생되면 이는 맨드릴(mandrel)에 감긴 광섬유에 압력파로 도달하게 되며, 음압의 세기에 비례한 변위(strain)를 일으켜 광 경로차가 발생하게 된다.

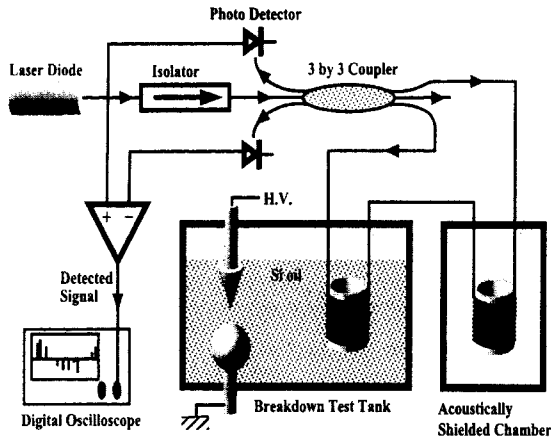


그림 2 본 연구에 사용된 Sagnac 간섭계의 구성도  
Fig. 2 Structure of Sagnac interferometer used in this research

센서로 사용된 광섬유는 동작파장 1310nm 인 단일모드광 섬유로 코팅직경이 250 $\mu$ m, 클래딩(cladding)직경이 125 $\mu$ m, 코어직경이 5 $\mu$ m의 구조를 가진다. 광원으로는 중심파장 1310nm 의 레이저 다이오드(E-TEK사 모델 109635)를 사용하였고 레이저로부터 나온 빛은 광원으로 되돌아가는 빛을 막기 위한 Isolator를 지나 3 $\times$ 3 광섬유 결합기(E-TEK사 모델 SMFC5400PH211)을 통하여 광섬유 루프로 입사되어 서로 반대방향으로 진행된다. 각각의 광섬유 소자들은 대부분 용융접착식으로 연결하여 손실을 최소화하였다.

간섭계의 루프에는 각각 신호코일(signal coil)과 기준코일(reference coil)의 역할을 하는 2개의 광섬유맨드릴(optical fiber mandrel)이 장치되는데, 각 맨드릴은 알루미늄으로 되어 외경 48mm, 높이 50mm의 크기를 가지며 여기에 60m씩의 광섬유가 감겨져 있다. 이 중 기준코일용 맨드릴은 외부 자극의 영향을 최소화하기 위해 음향차단상자(acoustically shielded chamber) 속에 설치하였다. 일반적으로, Sagnac 간섭계는 루프의 길이가 길수록 음압을 감지할 수 있는 능력은 향상되나 Sagnac 루프상의 광섬유에 불필요한 잡음신호의 유입을 막기 위하여 음향센서부분을 제외한 나머지 부분은 음향차단상자 속에 설치하였다.

신호코일용 맨드릴은 전력용변압기에서 발생할 수 있는 방전현상을 모의하기 위해 만든 소형절연유 유입탱크 내부에 설치되며 방전전극으로부터의 거리는 약 10 cm정도가 되게 조절되었다. 방전전극으로는 침대구전극(needle-sphere electrode)을 사용하였고 절연유로는 실리콘 오일을 사용하였으며 실험은 상온에서 진행되었다.

#### 4. 결과와 검토

##### 4.1 PZT를 이용한 간섭계 성능평가

우선 본 연구에서 설계한 광섬유 Sagnac 간섭계가 간섭계로써 제대로 작동하는 지를 확인하기 위해 광섬유가 감겨진 원통형 PZT에 함수발생기로부터 만들어진 198kHz 정현

파신호를 인가하여 인위적 변위를 가한 후 광섬유센서로 검출된 신호를 확인하였다. 그림 3은 PZT에 인가되는 신호와 광섬유센서로 검출된 신호를 동시에 보여주는 결과로써 Sagnac 간섭계가 PZT의 기계적 변화를 거의 원형에 가깝게 검출할 수 있음을 알 수 있다. 이는 PZT가 진동함에 따라 거기에 감긴 광섬유에 직접적으로 변위를 일으키게 하여 Sagnac 간섭계가 같은 주파수를 감지하게 된 것이다.

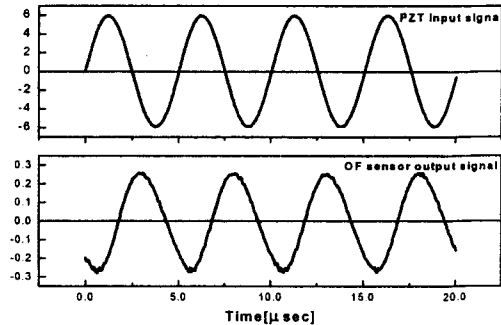


그림 3 PZT에 인가된 정현신호와 광섬유센서의 검출신호  
Fig. 3 PZT input signal and detected signal by the OF Sagnac interferometer

##### 4.2 유증 방전신호 검출

그림 4는 그림 2에 소개한 실험장치를 이용하여 유증에서 방전이 일어났을 때 Sagnac 간섭계로 검출한 신호이다. 방전시 발생한 충격파가 절연유의 탄성에 의해 약 4 msec 정도의 진동을 지속함을 볼 수 있다.

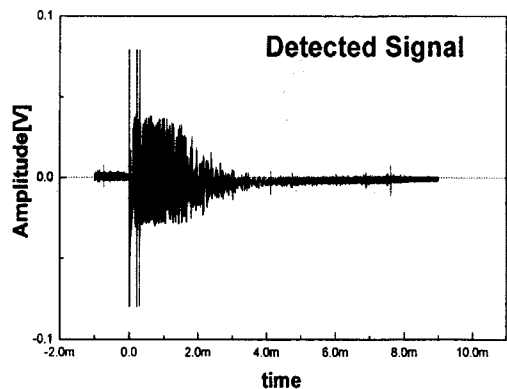


그림 4 광섬유센서로 검출된 방전신호  
Fig. 4 Discharge signal detected by the OF Sagnac interferometer

그림 5는 검출된 방전신호의 앞부분을 확대한 파형으로 검출된 신호에 고주파와 저주파의 두가지 성분이 겹쳐져 있음을 볼 수 있다. 여기서 고주파성분의 신호는 방전시 발생한 전기적 유도잡음으로 판단되며 이는 광섬유센서를 작동시키지 않은 상태에서 측정된 방전신호인 그림 6을 근거로 하는 것이다. 즉, 그림 6의 잡음신호는 Sagnac 광섬유 센서에서 감지된 신호가 아니다. 이는, 방전 발생장치에서 계측

기로 연결된 BNC 케이블로 타고 입력되는 잡음신호이며, 광섬유의 작동 유무와는 전혀 무관한 신호이다. Sagnac 간섭계의 전원을 끈 상태에서 이때 초음파신호가 전혀 없고 오로지 유도잡음만을 검출한 그림 6의 신호를 FFT(fast fourier transformation)처리하여 분석하여 보면 약 10MHz 까지의 고주파성분이 존재하고 특히 2, 4, 6 MHz 부근 주파수에서 매우 큰 피크값을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7은 그림 6의 잡음신호를 FFT처리한 결과이다.

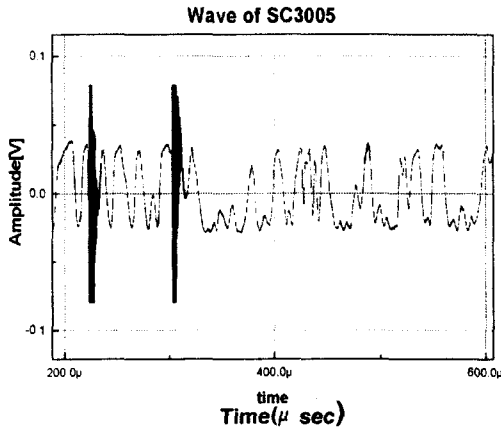


그림 5 검출신호된 방전신호 중 잡음이 중첩된 부분의 확대부분  
 Fig. 5 Enlarged detected discharge signal in which the noise signals are overlapped

반면 유중에서 전달되는 초음파신호를 성분 분석한 결과가 그림 8 인데 이 경우 대부분의 주파수 성분이 300kHz 이하에 분포하고 있다. 따라서 유중 방전신호에서 검출된 신호에는 초음파신호와 잡음신호가 함유되어 있으며 초음파신호는 주로 300kHz이내이고 잡음신호는 1MHz 이상의 고주파성분을 가진다고 말할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 주파수분석의 결과를 기초로 방전시 검출된 신호 중에서 초음파신호에 함유되어 있는 잡음신호를 제거하기 위해 소프트웨어적인 저대역통과 디지털필터 (low pass digital filter)를 설계하였다. 설계된 필터는 Butterworth 2차 저대역필터를 이용하여 차단주파수 500kHz가 되게 설정하였다. 그림 9는 필터를 통과하기 전과 통과한 후의 방전신호를 비교한 것으로 통과 후의 신호에서 고주파성분의 잡음신호가 제거되었음을 알 수 있다.

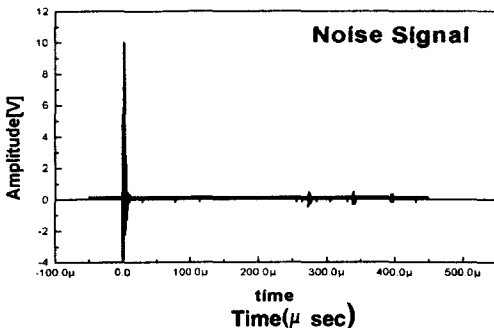


그림 6 검출된 잡음신호  
 Fig. 6 Detected noise signal

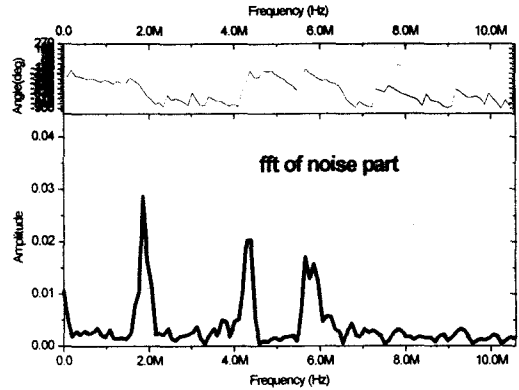


그림 7 잡음신호의 FFT 스펙트럼  
 Fig. 7 FFT spectrum of noise signal

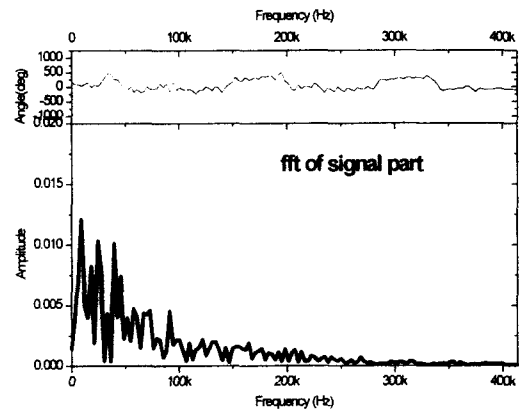


그림 8 방전신호의 FFT 스펙트럼  
 Fig. 8 FFT spectrum of discharge signal

### 5. 결론

본 연구에서는 유중 방전신호를 광섬유센서를 이용하여 검출하기 위해 Sagnac 간섭계를 이용한 광섬유센서 시스템을 구현하였고, 이를 이용하여 유중 방전신호를 측정할 결과 방전신호를 성공적으로 검출할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 설계한 광섬유 Sagnac 간섭계가 초음파신호를 제대로 검출할 수 있는지를 압전진동자인 PZT를 사용하여 실험한 결과 초음파신호를 거의 원형에 가깝게 검출할 수 있었다.

또한 방전신호 측정시 초음파신호에 유도잡음이 섞이게 되는데 초음파신호의 주파수성분은 300kHz이하인 반면 유도잡음은 1MHz 이상의 고주파성분임을 FFT를 이용한 주파수 분석으로 통하여 확인하였다. 이러한 유도잡음을 제거하기 위해 저대역통과 디지털필터를 설계하였으며 적용결과 초음파신호로부터 유도잡음을 효과적으로 제거할 수 있었다.

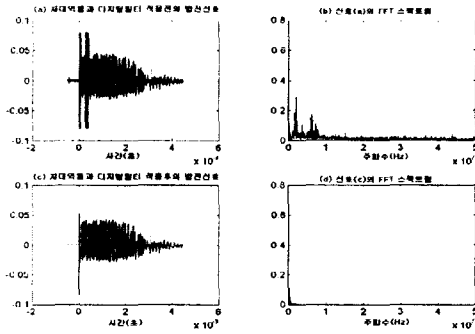


그림 9 저대역통과 디지털필터를 적용하기 전과 후의 방전신호

Fig. 9 Discharge signal before and after the low pass digital filter applied

**감사의 글**

본 연구는 1998년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관(과제번호: 98-지-01)으로 수행되었음.

**참고 문헌**

[1] June-Ho Lee and Tatsuki Okamoto, "A Study on the Partial Discharge Patterns from Multi-Defect Insulating Systems", J. EES., Vol. 3, No. 2, pp. 170-173, 1998.  
 [2] S. A. Boggs, "Partial Discharge Part I: Overview and Signal Generation", IEEE Elec. Insul. Mag., Vol. 6, No. 4, pp. 33-39, 1990.  
 [3] G. C. Stone, "The Use of Partial Discharge Measurements to Assess the Condition of Rotating Machine Insulation", IEEE Elec. Insul. Mag., Vol. 12, No. 4, pp. 23-27, 1996.  
 [4] P. von Glahn, K. L. Stricklette, R. J. Van Brunt and Cheim, "Correlations between Electrical and Acoustic Detection of Partial Discharge in Liquids and Implications for Continuous Data Recording", Conf. Record of 1996 IEEE ISEI, Vol. 1, pp. 69-74, 1996.  
 [5] R. T. Harrold, "Acoustic Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 20, No. 1, pp. 3-19, 1985.  
 [6] 권동진, 광희로, 정상진, 김정부, "초음파 신호 수의 이동평균에 의한 전력용 변압기 예방진단", 대한전기학회 논문지, 45권, 3호, pp. 432-437, 1996.  
 [7] 이우영, 김광화, 송일근, 김주용, 김상준, "23kV급 전력케이블 조립형 직선접속재의 활성진단 부분방전 검출기기 개발", 대한전기학회 논문지, 47권, 3호, pp. 358-363, 1998.  
 [8] 大越孝敬, 光ファイバセンサ, オーム社, 1986, pp. 5-8.

[9] A. Zargari and T. R. Blackburn, "Modified Optical Fibre Sensor for PD Detection in High-Voltage Power Equipment", Conf. Record of 1996 IEEE ISEI, Vol. 1, pp. 424-427, 1996.  
 [10] Peter Hauptmann, *Sensors Principles and Applications*, Prentice Hall, 1991, pp. 75-114.  
 [11] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, 1991, pp. 63-64.

**저 자 소 개**



이 종 길 (李鍾吉)

1962년 2월 23일생. 1984년 부산대 기계설계학과 졸업. 1990년 12월 미국 Univ. of Utah 기계공학과 졸업(석사). 1993년 8월 미국 Univ. of Utah 기계공학과 졸업(공학박). 1984~1989 국방과학연구소 연구원. 1989~1994 Univ. of Utah Research Associate. 1995~1998 국방과학연구소 선임연구원. 1998~현재 안동대학교 기계공학교육과 조교수  
 Tel : 054-820-5487  
 E-mail : jlee@andong.ac.kr



이 준 호 (李峻昊)

1962년 9월 25일 생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993~1994 일본전력중앙연구소 초빙연구원. 현재 호서대 전기공학부 부교수  
 Tel : 041-540-5416  
 E-mail : leejh@office.hoseo.ac.kr

김 상 준 (金相俊)

전기학회논문지 제 48권 8호 참조  
 Tel : 042-865-5970  
 E-mail : sjkim@kepri.re.kr