

# 變壓器 豫防診斷을 위한 超音波 信號 檢出에 關한 研究

(A Study on the Detection of Ultrasonic Signal  
for the Diagnosis of Transformer)

權東震\* · 郭熙魯\*\*

(Dong-Jin Kweon · Hee-Ro Kwak)

## 요 약

본 논문에서는 부분방전에 의해 발생하는 초음파를 이용하여 변압기 절연성능을 예방진단하기 위하여 실 변압기 구조물이 있을 경우에 변압기 고압권선의 표면과 권선과 철심사이에서 초음파를 임의로 발생 시킨 후 변압기 외함에서 초음파 신호 측정 시스템으로 이를 검출하여 분석함으로써 실 변압기에 적용 시킬 경우 발생할 수 있는 문제점에 대하여 연구하였다. 실 변압기에서 구조물이 있을 경우에 고압권선의 표면이나 권선과 철심 사이에서 발생하는 초음파는 초음파 탐촉자의 위치를 적절히 선정함으로써 변압기 외함에서 측정 가능하였다.

## Abstract

This paper describes the detection of the ultrasonic signals reduced by materials of a transformer for diagnosis of the transformer using ultrasonic signal which is generated by partial discharge. When partial discharge is generated on the surface of the winding and between the winding and the core in the transformer, the ultrasonic signal can be measured as the proper selection of the ultrasonic detectors' location.

### 1. 서 론

변압기는 전력의 안정공급에 관련된 매우 중요한 설비로서 그 기능이나 성능을 충분히 확보하여야 하므로 사고를 예방하기 위한 절연진단의

필요성이 증가되고 있다. 따라서 변압기의 유지보수는 이상징후를 운전상태에서 상시 감시하여 예기치 않았던 절연과피가 발생되기 이전에 처리하는 예방보전기술을 중심으로 변하고 있다.<sup>1)~3)</sup>

변압기의 진단방법<sup>4)~7)</sup>중에서 부분방전에 의해 발생하는 초음파를 측정하는 방법은 운전중인 변압기에도 용이하게 적용할 수 있으므로 변압기의 절연이상을 조기에 검출하여 사고를 미연에 방지할 수 있다. 또한 이상발생부의 위치포착이 가능

\*正會員：崇實大 大學院 電氣工學科 博士課程.

\*\*正會員：崇實大 工大 電氣工學科 教授.

接受日字：1995年 8月 28日

하므로 이상부위의 수리를 용이하게 할 수 있으며 수리비와 수리시간을 최소화할 수 있다. 또한 초음파 탐촉자를 변압기 외함에 부착하기 때문에 측정이 간편하고 변압기 상태와는 독립적으로 취부할 수 있으므로 변압기의 운전중에도 진단장치의 점검이 가능하다.<sup>8~9)</sup> 그러나 변압기의 내부구조가 상이한 조건에서는 측정 데이터도 상이하며, 변압기 구조물을 통과할 경우에는 초음파 신호가 감쇄될 수 있다. 따라서 현장에 적용하기 위해서는 실 변압기에서의 초음파 신호 특징과 변압기 구조물의 영향으로 인한 초음파 신호의 감쇄정도 등을 명확히 파악하여야 할 것이다.

본 논문에서는 부분방전이 발생될 가능성이 많은 고압권선의 표면이나 권선과 철심사이에 부분방전이 일어날 경우에 발생하는 초음파와 유사한 초음파를 발생시킨 후 이를 변압기 외함에서 측정하여 초음파 신호 측정 시스템을 실 변압기에 적용할 경우에 발생하는 문제점과 예방보전 시스템으로의 적용 가능성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

초음파 신호를 검출하고 분석하기 위한 실험장치는 그림 1과 같이 모의 변압기 및 실 변압기, 초음파 발생장치(압전 진동자) 및 초음파 신호 측정 시스템으로 구성하였다. 초음파 신호 측정 시스템은 전치 증폭기, 애널로그 부분, 디지털 부분, 컴퓨터 및 자료전송 부분으로 구성하였다. 전치 증폭기는 40[dB]의 이득을 갖도록 하였다. 애널로그 처리부는 6개의 초음파 탐촉자로 부터 동시에 신호를 입력받을 수 있도록 구성하였으며, 부분방전에 의한 초음파 신호와 외부 노이즈를

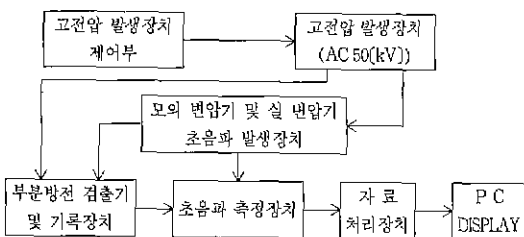


그림 1. 초음파 신호 측정 시스템의 개략도  
Fig. 1 Schematic diagram of the ultrasonic signal detector

분리하기 위하여 주파수 대역이 100[kHz]~300[kHz]인 필터를 제작하였다. 초음파 신호 측정 시스템으로 전송된 초음파 신호는 디지털 회로나 신호분석기로 신호를 처리하기 위해 8[dB]~26[dB]로 증폭시켰으며 볼륨저항을 사용하여 이득을 조절할 수 있도록 하였다. 디지털 처리부는 장치의 확장성을 고려하여 24개의 애널로그 신호를 입력받을 수 있도록 하였다.

압전 진동자의 양단에 전기신호를 가하면 기계적 진동이 일어나게 된다. 이러한 압전 역효과를 이용하여 부분방전시 발생하는 초음파와 유사한 초음파가 발생되도록 펄스 발생회로와 공진 주파수 500[kHz]인 압전 진동자(PZT-5A)를 이용하여 초음파 발생장치를 구성하였다. 실 변압기는 단상 50[kVA](13,200/230[V]) 성층철심형 변압기를 사용하였으며, 전력용 변압기와 같은 형태를 모의하기 위하여 650×650×800[mm]의 외함을 제작하였다. 실 변압기의 철심은 높이 420[mm], 폭 160[mm], 길이 340[mm]이며, 권선은 높이 300[mm], 직경 300[mm]의 단상 외철형이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

일반적으로 변압기 내에서의 부분방전 발생부는 유침지로 둘러 싸여 있으므로, 부분방전에 의한 초음파는 초음파 탐촉자까지 신호가 전파되는 동안 감쇄된다. 따라서 변압기 외함에서 초음파

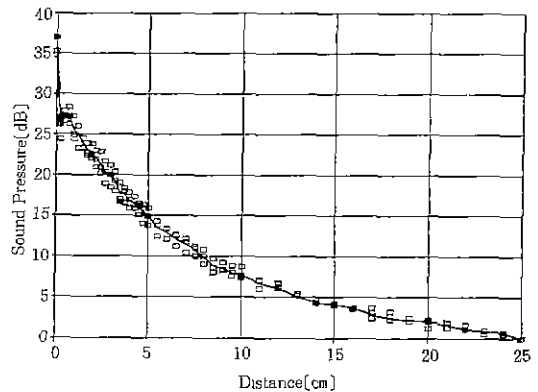


그림 2 초음파 발생장치와 탐촉자 간의 거리에 따른 음압의 감쇄  
Fig. 2. Sound pressure attenuation with distance between the ultrasonic generator and detector

신호를 측정하여 변압기 내부의 부분방전 진전상태를 파악하기 위해서는 초음파 발생원과 초음파 탐촉자 간의 거리 및 변압기 구조물로 인한 초음파의 감쇄특성에 대하여 고려할 필요가 있다.

매질내에서 전파되는 초음파의 거리에 따른 감쇄정도를 측정하기 위하여 초음파 발생장치와 초음파 탐촉자를 마주 보게 제작한 초음파 실험장치를 모의 변압기 내에 설치하였다. 초음파 발생장치에 폭  $4.9(\mu s)$ , 주기  $32(ms)$ , 크기  $2.9(V)$ 인 펄스를 인가하여 초음파를 발생시키고 초음파 탐

촉자와의 대향거리를  $0(mm) \sim 250(mm)$ 로 변화시키면서 측정한 대향거리 변화에 따른 음압의 감쇄 결과는 그림 2와 같다. 이때 절연유의 온도는  $4(^{\circ}C) \sim 5(^{\circ}C)$  범위이다. 초음파 탐촉자에서 측정된 파형은  $270(mV_{p-p}) \sim 4.4(mV_{p-p})$ 의 범위로서 그림 2는 초음파 발생장치와의 대향거리가  $250(mm)$ 일 경우를 기준 음압으로 하여 데시벨로 나타낸 것이다. 거리에 따른 음압의 감쇄는 원거리 음장<sup>11)</sup>에서 약  $29.9e^{-0.150}(dB/cm)$ 로 감소하였다.

그림 3은 초음파 탐촉자와 초음파 발생장치의 대향거리 변화에 따른 초음파 파형의 변화로서, (a)의 파형은 거리가  $50(mm)$ 일 경우이며, (b)의 파형은 거리가  $150(mm)$ 일 경우이다. 초음파 탐촉자

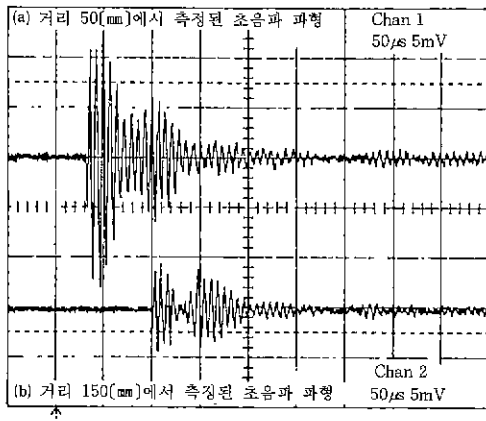


그림 3 초음파 발생장치와 탐촉자의 대향거리 변화에 따른 초음파 파형의 변화  
Fig. 3. Ultrasonic wave variation with distance between the ultrasonic generator and detector

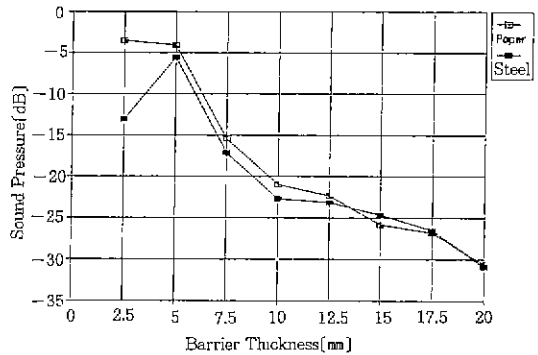


그림 5. 변압기 구조물에 의한 음압의 감쇄  
Fig. 5. Attenuation of the sound pressure by materials of transformer

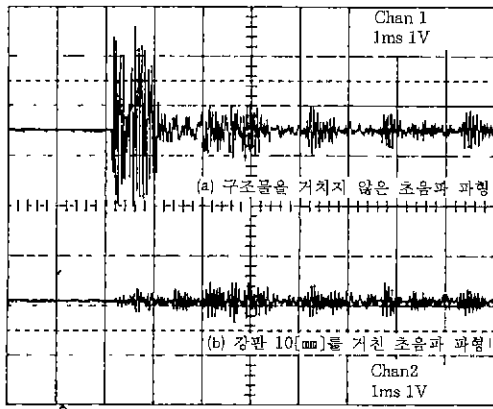


그림 4. 변압기 구조물에 의해 변형된 초음파 신호  
Fig. 4. The ultrasonic signals interfered by materials of transformer

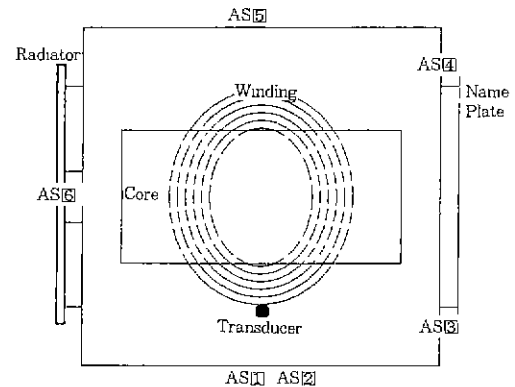


그림 6. 초음파 탐촉자 및 권선표면의 초음파 발생장치 설치위치  
Fig. 6. Position of the ultrasonic detectors on the wall and the transducer on the winding

의 대향거리가 증가됨에 따라 초음파 파형의 감소와 시간지연도 증가되었다.

변압기 외함에서 초음파를 검출할 경우 변압기 구조물에 의해 초음파가 변형된다. 이와 같은 영향을 고찰하기 위하여 초음파 발생장치와 초음파 탐촉자 사이에 구조물이 설치되지 않은 경우와 프레스보드, 강판(steel) 등과 같은 구조물이 설치된 경우를 비교하였다. 그림 4는 구조물이 없는 경우와 변압기 구조물로 10[mm] 두께의 강판이 있는 경우에 측정된 초음파 파형이다. 이때 초음파 발생장치와 초음파 탐촉자의 간격은 150[mm]이다. 변압기 구조물이 있을 경우, (b)와 같이 초음파 파형의 앞부분이 크게 감쇄되었으나 파형의 뒷부분은 간섭과 전달경로의 영향<sup>12)</sup>으로 인하여 앞부분의 감쇄에 비해 적게 감쇄됨을 볼 수 있다.

그림 5는 변압기 구조물에 의한 음압의 감쇄를 고찰하기 위하여 강판과 프레스보드의 두께를 1[mm]~20[mm]까지 변화시키면서 초음파 신호를 측정하는 것이다. 변압기 구조물이 프레스보드의 경우 초음파의 감쇄는 약  $72.5e^{-0.225}$ [dB/cm] 정도였으며, 강판의 경우 감쇄는 약  $73.8e^{-0.106}$ [dB/cm]이었다. 또한 변압기의 구성재료로 사용되는 구리 및 규소강판은 강판의 경우와 비슷한 감쇄를 나타내었으며, 절연지의 경우는 프레스보드와 비슷한 감쇄를 나타내었다. 이와 같이 변압기 구조물에 의해 초음파 신호는 탐촉자에 도달할 때까지 감쇄되고, 거리에 따라서도 감쇄되므로 측정되는 초음파 신호의 절대적인 크기로 부분방전의 크기를 추정하는 것은 불가능할 것으로 사료된다. 따라서 부분방전에 의해 발생하는 초음파 신호를 검출하여 변압기를 상시 진단하기 위해서는 기준레벨 이상의 초음파 신호를 계수하여 초음파 신호 수의 시간적인 변화경향을 측정하여 부분방전의 진전상황을 파악하는 것이 보다 중요할 것으로 사료된다.

실 변압기에서 부분방전이 발생할 가능성이 많은 고압권선의 표면에서 부분방전이 발생할 경우를 모의하기 위하여 그림 6과 같이 실 변압기에 초음파 발생장치를 325×175×260[mm]의 위치에 설치하고 AS<sub>1</sub>~AS<sub>6</sub>까지 6개의 초음파 탐촉자를

다음과 같이 부착하였다.

AS<sub>1</sub> : 325×0×260      AS<sub>2</sub> : 325×0×550  
 AS<sub>3</sub> : 650×175×260      AS<sub>4</sub> : 650×550×495  
 AS<sub>5</sub> : 325×650×260      AS<sub>6</sub> : 0×300×260

초음파 탐촉자 AS<sub>1</sub>은 초음파 발생장치의 설치 위치와 같은 높이에 대향되도록 설치하였다. 거리에 따른 초음파의 변화를 측정하기 위하여 AS<sub>2</sub>는 AS<sub>1</sub>에서 290[mm] 상부에 설치하였으며, AS<sub>3</sub>은 AS<sub>1</sub>과 같은 높이로 명판이 설치된 변압기의 측면에 설치하였다. AS<sub>4</sub> 및 AS<sub>5</sub>은 변압기 구조물에 의한 초음파 신호의 감쇄를 파악하기 위하여 초음파 발생장치와 대각선 방향에 설치하였다. AS<sub>6</sub>는 변압기의 철심 및 권선을 장벽으로 하는 초음파 발생장치와 반대방향에 설치하였다. 초음파 발생장치로 사용한 압전 진동자는 부분방전이 변압기 권선의 표면에서 일어난 것과 같은 현상을 모의하기 위하여 권선에 최대한 밀착시켰다.

그림 7은 권선의 표면에서 초음파가 발생될 경우, 초음파 탐촉자의 부착위치에 따른 초음파 신호의 검출결과이다. 이때 초음파 발생장치에 인가한 펄스의 주기는 16[ms], 펄스 폭은 21.3[μs], 펄스 크기는 3.0[V]로 하였으며, 초음파 신호 측정 시스템은 각 채널의 이득이 56.5[dB]로 균일하도록 조정하였다. 그림 7에서 AS<sub>1</sub>, AS<sub>2</sub> 및 AS<sub>3</sub>은 초음파 발생장치로부터 초음파 탐촉자까지 초음파 신호가 전파되는 경로에 변압기 구조물이

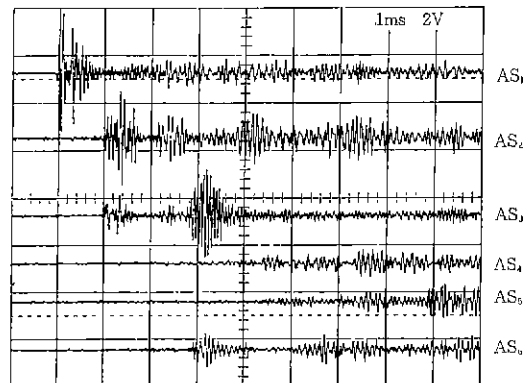


그림 7. 권선의 표면에서 발생한 초음파의 측정 파형  
 Fig. 7 The detection waves of the ultrasonic generated on the surface of the winding

존재하지 않으므로 초음파 신호의 측정이 용이하였다. 그러나 AS<sub>2</sub> 및 AS<sub>3</sub>은 AS<sub>1</sub>에 비하여 거리가 멀리 있으므로 초음파 파형이 감쇄되어 나타났다. 또한 AS<sub>3</sub>는 초음파 신호의 전파경로에 변압기의 권선 및 철심이 300[mm] 존재하므로 변압기 구조물의 영향으로 초음파 파형이 AS<sub>1</sub>에 비하여 약 21[dB] 정도 감쇄되었다. AS<sub>4</sub> 및 AS<sub>5</sub>은 초음파 신호가 변압기 구조물을 거치는 정도에 따라 초음파 신호의 크기가 감쇄되었음을 볼 수 있다.

권선과 철심사이에서 부분방전이 발생될 경우를 모의하기 위하여 그림 8과 같이 초음파 발생장치를 450×280×255[mm]의 위치에 설치하고, AS<sub>1</sub>에서 AS<sub>5</sub>까지 5개의 초음파 탐촉자를 다음과 같이 설치하였다.

AS<sub>1</sub> : 450×0×255      AS<sub>2</sub> : 650×170×255  
 AS<sub>3</sub> : 450×650×255      AS<sub>4</sub> : 200×650×500  
 AS<sub>5</sub> : 0×300×255

이때 초음파 탐촉자 AS<sub>1</sub>은 초음파 발생장치의 위치와 같은 높이에서 대향되도록 설치하였으며, AS<sub>2</sub> 및 AS<sub>5</sub>는 철심이 있는 측면에 설치하였으며, AS<sub>3</sub>는 철심과 권선의 대각선 방향에 설치하였다. 이때 AS<sub>2</sub>는 변압기 철심의 두께 55[mm]가 장벽으로 놓여 있는 상태이며, AS<sub>3</sub>는 철심 및 권선의 두께 280[mm]가 장벽으로 놓여 있는 상태가 되도록 하였다. 또한 AS<sub>3</sub>은 AS<sub>1</sub>과 반대방향에

설치하였다.

그림 9는 권선과 철심사이에서 초음파가 발생했을 경우, 초음파 탐촉자의 부착위치에 따른 초음파 신호의 검출결과이다. 이때 초음파 발생장치에 인가한 펄스의 주기는 16[ms], 펄스 폭은 21.3[μs], 펄스 크기는 3.1[V]로 하였다. 초음파가 변압기 권선과 철심사이에서 발생한 경우에 초음파 탐촉자 AS<sub>1</sub>에서는 초음파 발생장치로부터 권선과 철심 사이의 공간으로 인하여 초음파 신호의 측정이 용이하였다. 또한 AS<sub>3</sub>도 AS<sub>1</sub>과 반대방향에서 용이하게 초음파 신호를 측정할 수 있었다. 그러나 AS<sub>5</sub>는 초음파 발생장치와의 이격거리가 AS<sub>1</sub>에 비하여 크므로 초음파 신호의 크기가 감쇄하였으며 잔향이 크게 나타났다. AS<sub>2</sub>는 장벽으로 철심이 55[mm] 놓여 있으므로 파형의 앞부분이 감쇄되었으며 간섭의 영향으로 파형 뒷부분의 크기는 비교적 크게 나타났다. AS<sub>4</sub> 및 AS<sub>5</sub>는 변압기의 철심 및 권선의 영향으로 초음파 파형이 AS<sub>1</sub>에 비하여 감쇄되었으며, 특히 대각선 방향에 설치한 AS<sub>3</sub>에서는 초음파 파형이 노이즈와 구별이 용이하지 않을 정도로 감쇄하였다. 이와 같이 초음파 신호가 권선의 표면이나 철심과 권선사이에서 발생될 경우, 변압기 구조물에 의해 초음파 신호는 감쇄되었으나 초음파 탐촉자의 위치를 적절히 선정함으로써 초음파 신호를 검출할 수 있었다.

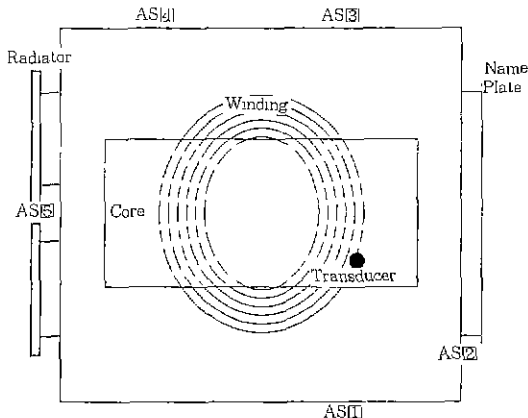


그림 8. 초음파 탐촉자 및 권선과 철심사이의 초음파 발생장치 설치위치

Fig. 8 The position of the ultrasonic detectors on the wall and the transducer between the core and the winding

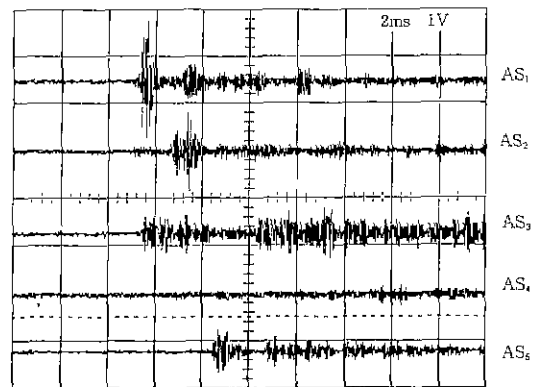


그림 9 철심과 권선사이에서 발생한 초음파의 측정 파형  
 Fig. 9 The detection waves of ultrasonic generated between the core and the winding

#### 4. 결 론

온라인 적용이 가능한 초음파 측정기법을 이용한 변압기 예방진단 기법을 현장에 적용하기 위하여 실 변압기 구조물이 존재할 경우에 외함에서 초음파 신호를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 거리에 따른 초음파의 상대음압분포는 원거리 음장에서  $29.9e^{-0.150r}$  [dB/cm]로 감쇄하였으며, 변압기 구조물에 의한 초음파의 감쇄는 프레스토드의 경우에는 약  $72.5e^{-0.220r}$  [dB/cm]로 감쇄하였으며, 강판의 경우에는  $73.8e^{-0.206r}$  [dB/cm]로 감쇄하였다.

2. 실 변압기에서 부분방전이 발생할 수 있는 고압권선의 표면이나 권선과 철심 사이에서 발생한 초음파는 변압기 구조물이 존재할 경우에도 초음파 탐촉자의 위치를 적절히 선정함으로써 검출할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) H. Kaward et al., "Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer," IEEE Trans PAS, Vol. 103, No. 2, pp 422~428, 1984.
- 2) 小松 巖 外, "變電所の豫測保全システム," ED-89

- 20, pp 107~120, 1989.

- 3) 田中一郎 外, "變壓器の豫防保全技術の現況とその動向," 電氣學會誌, pp. 3~48, 1990.
- 4) R. Malewski et al., "Insulation Diagnostic System for HV Power Transformers in Service," CIGRE Paper, 12-01, 1986
- 5) 광희로 등, "변압기 권선 고장검출을 위한 진동분석 시스템 개발 연구," 한국전력공사 보고서, 1994, pp. 1~192
- 6) G. Belanger, G. Missout and J.P. Gibeault, "Laboratory Testing of a Sensor for Hydrogen Dissolved in Transformer Oil," IEEE Trans. EI, Vol. 15, No. 2, pp.114~148, 1980
- 7) M. Yamada et al., "Automatic Field Monitoring of Dissolved Gases in Transformer Oil," IEEE Trans., PAS, Vol. 100, No. 4, pp. 1538~1544, 1981
- 8) 권동진·광희로 등, "초음파 측정 연구, 한국전력공사 보고서," 1993, pp 1~1~10-6.
- 9) 광희로 등, "상호상관을 이용한 변압기 내의 부분방전 위치 측정," 한국조명·전기설비학회지, Vol. 7, No. 6, pp 34~41, 1993
- 10) 권동진·광희로 등, "초음파 센서를 이용한 변압기 예방진단 기술 연구," 한국조명·전기설비학회지, Vol. 8, No. 2, pp 46~53, 1994.
- 11) 전자기술연구회, "초음파 응용," 기문사, 1992, pp. 11~59
- 12) M. G. Duncan, "Acoustic Emission Calibration Instrumentation," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol. 38, No. 3, pp. 827~831, 1989.

#### ◇ 著 者 紹 介 ◇



권 동 진(權東震)

1963년 1월 20일생. 1986년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 전력연구실.



곽 희 로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1967년 한전 근무. 1986년 미국 MIT Visiting Scientist. 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수. 교무처장.