

변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출

(Detection and Location of Partial Discharge in Transformers)

郭熙魯* · 金載哲* · 黃善柱** · 權泰遠*** · 尹用範***

(Hee-Ro kwak · Jae-Chul Kim · Sun-Ju Hwang · Tae-Won Kwon · Yong-Beum Yoon)

요 약

본 논문은 전력용 변압기 내부의 부분방전의 탐지 및 위치검출 방법, 측정장치 개발에 대하여 고찰하였다.

부분방전의 위치검출은 부분방전시 발생하는 전기신호와 초음파신호를 동시에 측정하여 지연 시간차이를 이용 발생 위치를 추정할 수 있었다. 그리고 부분방전 발생시 모델변압기내의 절연유의 온도와 인가전압의 변화에 따른 부분방전량의 크기와 전기신호수를 측정한 결과 상관관계가 있음을 고찰할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 방법과 개발한 측정장치를 이용하여 실험실에서 모델 변압기에 적용하여 시험한 결과 모델 변압기내에서 발생한 부분방전의 탐지 및 위치검출이 가능함을 입증하였다.

Abstract

This paper describes an instrument for the detection and geometric location of partial discharge(PD) source in transformers. This instrument measures electric current pulses and ultrasonic pulses simultaneously, counts the number of electrical pulses and determines the geometric location of PD in transformers. It was found that there is a relationship between partial discharge magnitude and pulse repetition rate when the applied test voltage and oil temperature were varied. Through the laboratory test using model transformer, it was clarified that this detector could be used for detecting and locating PD in the transformer.

1. 서 론

최근 전력용 변압기는 전력 수요의 증가에 따라 초고압화 및 대용량화의 추세와 더불어

다량 설치되고 있다. 이러한 전력용 변압기의 사고시에는 정전 범위가 넓어지므로 막대한 경제적 손실을 가져다 주고, 사고 복구를 위한 장시간의 휴전에 따라 사회에 미치는 심리적

* 正會員 : 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수 · 공박

** 正會員 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정

*** 正會員 : 한국전력 기술연구원 계통연구실

영향 또한 막대하기 때문에 이러한 사고를 미연에 방지하기 위한 고 신뢰도 운전이 요구되고 있다. 따라서 고 신뢰도 운전을 위한 전력용 변압기의 예방진단 기법은 더욱 더 중요한 위치를 점하게 되었으며, 세계 각국에서 지속적인 연구와 관련 진단기기 개발이 진행되고 있다.

운전중인 전력용 변압기의 예방진단 기법은 부분방전 측정법, 유중가스 분석법 그리고 절연유 유전체역률 및 수분 측정법과 저압 서어지 시험법등이 있으나 현장 적용시 신뢰성을 높이기 위해서는 이들 방법을 종합하고 분석하는 상시감시 진단장치의 개발이 필요하다.

이와 관련된 부분방전 특성 및 위치 측정법은 1956년 J. G. Anderson¹⁾에 의해 본격적으로 연구가 시작되었으며, J. H. Carpenter²⁾는 음향 측정법으로 부분방전의 측정 및 위치판별이 가능함을 보여 주었다. Sulaiman³⁾은 유중에서의 코로나 개시전압 및 오염된 변압기유에서의 부분방전을 검출하여 이들의 변화 특성을 연구하였다.

그리고 E. Howells⁴⁾는 기름속에서의 부분방전 특성과 음속에 대한 관련 이론 연구 및 외부 잡음에 대하여 연구를 행하였고, H. Kawada⁵⁾에 의하여 부분 방전의 자동감시 기록장치가 개발되어 변압기 예방진단에 상당한 공헌을 하였다. 그러나 이들 장치도 감도가 낮고, 외부에서 발생하는 충격과 잡음으로 인한 신호와의 구별 곤란 등으로 아직 실제 적용에는 많은 어려움이 있다.

본 연구진에서는 감도가 높고, 정확한 부분방전 위치 및 발생빈도를 측정하기 위하여 자체 개발한 부분방전 위치측정기 및 부분방전 계수기와 Hipotronics사의 부분방전량 측정장치를 결합하여 모의 변압기 내에서 부분방전의 위치 및 발생 빈도와 방전량을 측정하여 발표한 바 있다. 실험시 정확한 결과분석을 위하여 메모리스크로프 및 신호 분석기와 X-Y기록기를 사용하였다.⁶⁾

또한 변압기 예방진단의 기초 자료를 작성하기 위하여 신유와 실제 운전중인 변압기에서 채취한 기름을 사용하여 인가전압과 기름의 온도를 변화시켜가며 부분방전량의 크기 및 발생빈도를 측정하여 결과를 발표한 바 있다.⁷⁾

본 논문에서는 상시감시 진단장치 개발의 일부로 변압기내 부분방전의 위치 탐지와 발생빈도를 자체 개발한 로고스키 코일과 초음파 센서 및 측정장치를 사용하여 측정함으로써 성능 및 현장적용의 가능성을 연구 검토하였다.

2. 실험장치의 구성

2.1 측정원리

운전중인 변압기 내부에서 부분방전의 발생은 여러가지 화학적 반응과 고 에너지의 전자와 이온간의 계속적인 충돌로 절연물의 수명을 단축시키므로 부분방전의 초기 발견 및 그 진행 상태와 위치를 찾는 것이 중요하다. 따라서 부분방전의 진전 상황을 판단 함으로써 변압기 예방진단의 자료로 사용할 수 있으며, 또한 그 발생 위치를 탐지함으로써 부분방전 상태의 심각성을 알 수 있다.

부분방전시 발생하는 음향신호와 전기신호는 압전소자를 이용한 초음파 센서와 로고스키 코일을 이용하여 각각의 신호를 측정하였다. 검출된 음향신호와 전기신호의 지연 시간에 음향 신호의 전달 속도를 곱함으로써 음향신호 탐촉자 위치로 부터 부분방전 발생위치까지의 거리를 구할 수 있다.

또한 로고스키 코일에서 측정한 전기신호는 기준레벨을 두어 레벨이상 신호를 계수하여 부분방전 측정장치(Hipotronics 사)로 측정된 부분 방전량과의 상관 관계를 검토하였다.

2.2 실험장치의 구성

부분방전의 위치 및 그 발생 빈도를 측정하기 위한 실험장치의 구성은 고압발생부 및 제어부, 모의 변압기, 전기신호 측정장치, 음향신

호 측정장치, 신호처리 장치, 펄스계수 장치 및 기록장치로 구성되어 있으며 그 개략도는 그림 1과 같다.

- 고압발생 및 부분방전량의 측정은 Hipotronics사의 Corona Free 변압기(0-50[kV]) 및 부분방전 측정장치인 모델 750-5CF와 CDO-77A1로 하였다.

- 모의 변압기는 80[cm]×40[cm]×45[cm] 크기로 부분방전 발생전극이 쉽게 이동할 수 있도록 제작하였으며, 기름의 온도제어 장치와 기름순환장치를 부착하였다.

- 음향신호 탐촉자는 공진주파수가 0.5 [MHz]인 Vernitran사의 PZT-5A를 이용하여 변압기 외벽에 손쉽게 부착할 수 있는 구조로 제작하였으며, 이 음향신호 탐촉자의 등가회로는 그림 2와 같다.

- Pre-amp는 음향신호 탐촉자로부터 검출

한 신호는 미약하기 때문에 신호를 60[dB]정도 증폭할 수 있는 콘덴서 결합형으로 구성하였으며 각 증폭단마다 표유용량(Stray Capacity)과 발진을 억제하기 위하여 동판 차폐를 하였고, 신호전달 케이블도 이중 케이블을 사용하였다. Pre-amp. 회로는 그림 3과 같다.

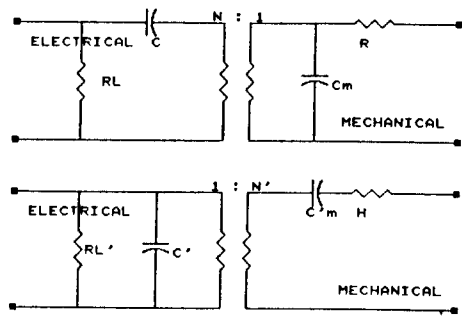


그림 2. 음향신호 탐촉자의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of acoustic sensor

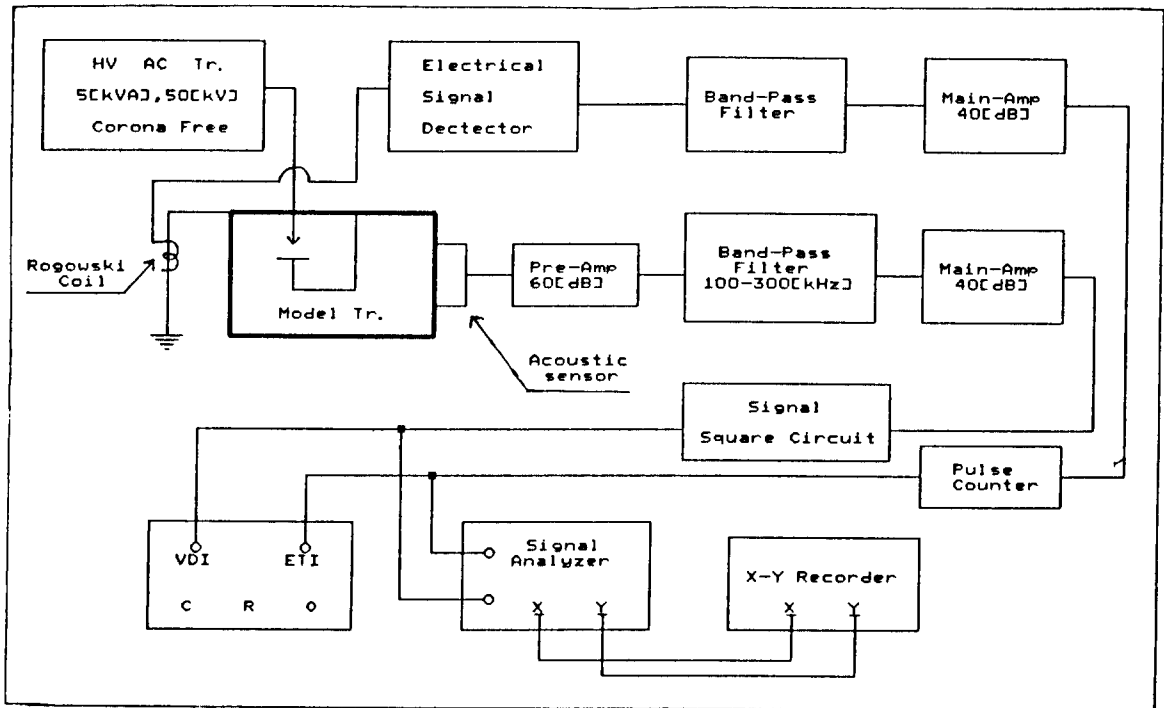


그림 1. 부분방전 탐지 및 위치 검출장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of apparatus for detection and location of PD.

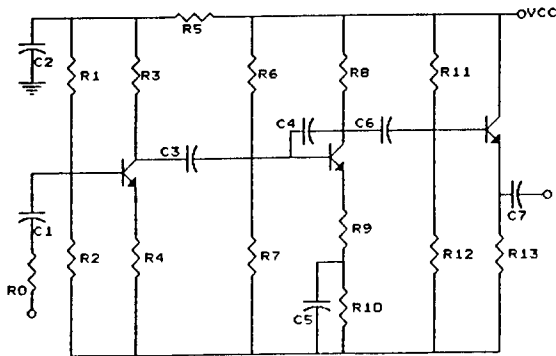


그림 3. Pre-amp. 회로도.
Fig. 3. Pre-amp. circuit.

이외에 음향신호 측정장치는 필터와 주 증폭기, 제곱 회로로 구성되어 있으며, 장치의 이상 유무 진단을 위해 자기진단장치를 부가하였다. 진단법 등 이와 관련된 자세한 사항은 참고문헌^{6), 7)}에 기술되어 있다.

전기신호 탐측자는 부분방전시 흐르는 고조파(10kHz이상) 전류신호를 측정하기 위하여 자체 제작한 로고스키 코일을 사용하였으며, 성능 검증을 위하여 Hipotronics사의 부분방전 측정장치(PD detector)로 검출한 신호와 로고스키 코일로 검출한 전기신호를 신호분석기로 분석하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 하단은 자체 제작한 로고스키 코일로 검출한 전기신호이며, 상단은 Hipotronics사의 부분방전 측정장치의 검출 신호로서 같은 시간대에서 거의 동일한 값을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

이 로고스키 코일에서 측정된 전기신호는 Pre-amp.로 증폭한 후 양호한 전달 특성과 안정도가 우수한 Butter-Worth대역통과 필터로 여과하여 증폭한 후 계수기(Pulse Counter)로 계수하였다.

3. 실험 및 결과검토

실험은 자체 제작한 부분방전 탐지 및 위치 검출 장치의 현장 적용을 목적으로 로고스키

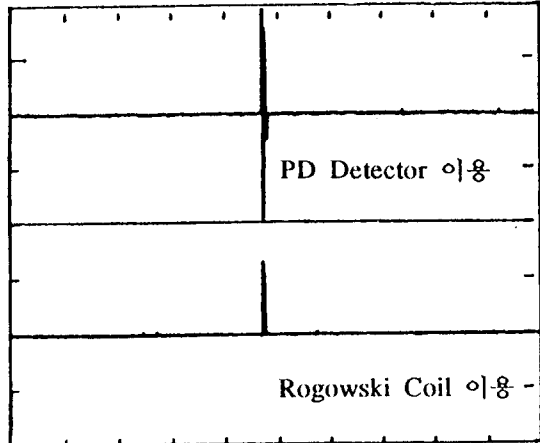


그림 4. 로고스키 코일과 부분방전 측정결과에 의한 전기신호 측정결과 비교
Fig. 4. Electrical pulse measured by Rogowski Coil and PD detector.

코일을 이용하여 전기신호를 검출한 후 신호 처리 및 계수 회로를 이용하여 부분방전량과 측정 시료의 온도 변화와 인가전압 변화에 따른 부분방전 발생횟수와 상관을 고찰하였다. 또한 음향신호 탐측자와 전기신호 탐측자(Rogowski Coil)를 이용한 위치 검출에 대한 사례연구를 행하였다.

3.1 부분 방전량과 부분방전 발생횟수의 측정실험

일반적으로 부분 방전량의 정확한 측정은 현장에서 거의 불가능할 뿐만 아니라 장치 또한 매우 복잡하다. 그러나 특정 레벨 이상의 부분방전 발생횟수는 로고스키 코일을 이용하여 전기신호를 검출한 후 신호 처리하여 계수함으로써 현장에서 측정이 가능하다. 본 논문에서는 침 대 평판 전극(침의 곡률반경 7[μm], 침 대 평판간격 1[cm])을 사용하여 운전중인 변압기(양지 #3 MTR, 외 8개소)에서 채취한 기름을 사용하여 인가전압 변화에 따른 방전량 및 펄스 수의 관계를 매 1개월마다 6개월(1989년 2월-1989년 7월)동안 조사하여 그 관계성을 비교 검토하였다. 대표적인 5개소의

30[°C]경우를 그림 5 및 그림 6에 나타내었다.

그림 5와 그림 6에서 볼 수 있듯이 부분 방전량과 부분방전 발생횟수는 상당히 유사한 관계를 보여주고 있다. 또한 온도를 30[°C], 50[°C], 70[°C], 90[°C]로 변화시켰을 때도 이들 관계는 역시 상당한 유사성을 갖고 있어 변압기 예방진단 목적에서 볼 때 현장 적용이 어려운 값 비싼 부분방전 장치보다는 부분방전 계수장치로써 부분방전의 탐지 및 진행 상황을 감지할 수 있으리라 생각된다.

3.2 부분방전 위치검출에 대한 사례연구

3.2.1 측정 이론

부분방전시 발생하는 충격파는 기름속에서 전파되어 일부는 변압기 외벽에 전달되고 일부는 반사된다. 따라서 변압기 외벽에서의 초음파 신호는 압전소자를 이용 검출하고, 동시에 부분방전의 전기신호는 로고스키 코일로 검출하여 그 시간차에 초음파의 유중 전달속도를 곱하면 음향신호 탐촉자 위치에서 부터 부분방전 발생위치 까지의 직선거리가 산출되며 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$D = V \times [Ta - Te] \quad (1)$$

여기서,

D : 부분방전 발생점에서 음향신호 탐촉자까지의 거리[m]

V : 변압기유에서 초음파 속도[m/s]

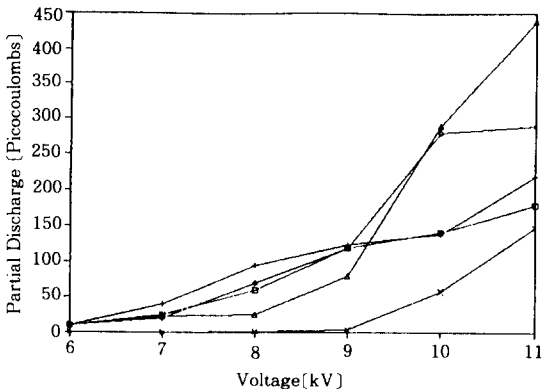
Ta : 음향 신호 도달 시간[sec]

Te : 전기 신호 도달 시간[sec]

이다.

3.2.2 위치 측정의 사례연구

모의 변압기내에 침 대 평판전극을 설치하고 변압기 외벽에 다섯개의 음향신호탐촉자를 부착하여 음향신호를 측정하였다. 첫번째 음향신호 탐촉자 AS1의 위치는 모의 변압기 좌측면 가로 0[cm], 세로 20[cm], 높이 15[cm], (0×20×15)이고 음향신호 탐촉자 AS2의 위치는 우측면 가로 80[cm], 세로 20[cm], 높이 15[cm],(80×20×15), 음향신호 탐촉자 AS3의 위치는 모의 변압기 후면 40[cm]×40[cm]×15[cm]이고, AS4의 위치는 우측면 80[cm]×5[cm]×15[cm]이며, AS5의 위치는 모의 변압기 앞면 6[cm]×0[cm]×15[cm]이다. 그리고 전기신호는 로고스키 코일을 이용하여 전극의 접지 부분에서 측정하였으며 부분방전의 위치(pd1)는 가로 39[cm], 세로 20[cm], 높이

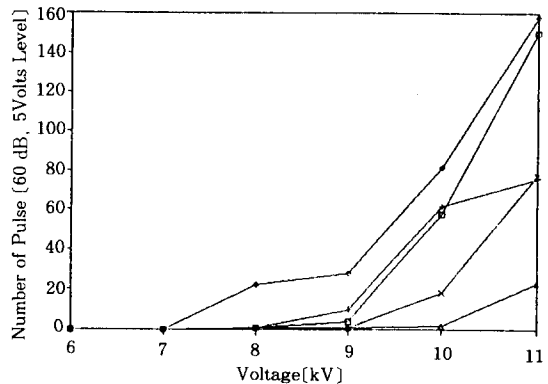


□ 양지 #3+양평 ◇ 노랑진 △ 송현 × 반월

(1989년 5월 25일 채취, 측정시 온도 30도)

그림 5. 인가전압 변화에 따른 방전량 비교

Fig. 5. Voltage dependence of partial discharge.



□ 양지 #3+양평 ◇ 노랑진 △ 송현 × 반월

(1989년 5월 25일 채취, 측정시 온도 30도)

그림 6. 인가전압 변화에 따른 펄스수 비교

Fig. 6. Voltage dependence of pulse count rate.

15[cm] (39×20×15)이다. 그림 7은 부분방전 발생위치와 음향신호 탐촉자 위치들을 보여주고 있다. 사례연구시 변압기유의 온도는 15[°C]였으며 이경우 유온에서 음속은 측정결과 $V=1,450[m/s]$ 였다.

실험시 인가 전압은 AC 11[kV]였으며 부분방전을 일으킨 침 대 평판전극의 곡률 반경은 0.01[mm]이고 간격은 1[cm]였다.

위의 조건 하에서 전기신호 탐촉자로부터 검출한 전기 신호(그림 8-a)와 음향신호 탐촉자 AS1으로부터 검출한 음향신호(그림 8-b)를 동시에 검출하여 X-Y기록기로 그려 그림 8에 나타내었다. 그림 8-a의 상단 우측 2.0874[ms]는 전기신호 측정시간(T_e)이며 그림 8-b의 하단 우측 2.3632[ms]는 음향신호의 측정시간(T_a)을 나타낸다. 따라서 두 신호의 지연시간은

$$T_a - T_e = 2.3632 - 2.0874 = 0.2754[ms]$$

이다. 따라서 15[°C]에서 초음파의 속도 1,450[m/s]을 고려하여 식(1)로 계산하면

$$D = (T_a - T_e) \times V = 0.2754[ms] \times 145[cm/ms] = 40[cm]$$

이다. 이경우 실제 거리는 39[cm]이므로 상대오차는 2.5[%]정도이다. 이와 같은 방법으로 각각의 음향신호 탐촉자에서 검출한 음향측정 신호시간을 이용하여 표1과 같은 결과를 얻었다. 표1의 결과를 보면 평균 상대오차는 4-5[%]정도로 상당히 정확하게 부분방전 발생 위치를 찾을 수 있다.

4. 결 론

변압기의 운전 상태에서 부분방전의 위치와 그 진행상태를 파악할 수 있는 부분방전 탐지 및 위치측정 장치를 사용하여 모의 변압기를 통한 사례연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) PZT-5A를 사용한 음향신호 탐촉자와 음향신호 처리회로를 이용하여 정확하게 음향신호를 측정할 수 있었다.

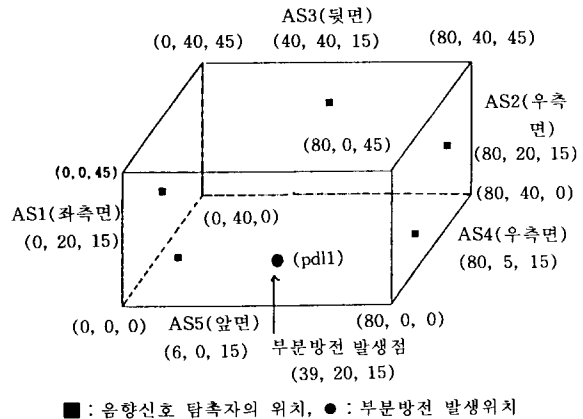


그림 7. 모의 변압기내의 부분방전 위치 및 음향신호 탐촉자 위치

Fig. 7. Location of PD source and acoustic sensors in model transformer

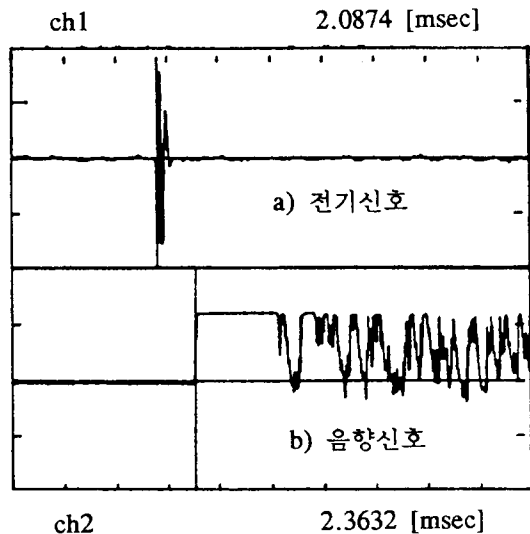


그림 8. 사례연구 1(pd1)의 전기신호와 음향신호의 비교

Fig. 8. Electrical and acoustic signal in case of study 1(pd1)

2) 자체 개발 제작한 로고스키 코일과 전기신호 처리회로로서 부분방전 측정장치의 도움없이 전기 신호를 검출함으로써 현장적용의 가능성을 제시하였다.

3) 측정 장치에 계수기(Pulse Counter)를 부

표 1. 부분방전 위치 pd1일때 실험결과(39×20×15)

Table 1. Experimental results in case of PD location pd1(39×20×15)

신호탐촉자	부분방전발생점과 센서간의 실제거리 D[cm] * 1	실제거리에 따른 시간차 [μsec] Td=D/V * 2	측정한 결과에 의한 시간차와 거리		실제거리와 측정거리에 의한 상대오차 [%] * 3
			시 간 [μsec]	거 리 [cm]	
AS1	39	268.97	275.8	39.99	2.5
AS2	41	282.76	292.9	42.47	3.6
AS3	20	137.93	144	20.88	4.4
AS4	43.6	300.69	303	43.94	0.8
AS5	36.8	252.41	271	39.30	7.4

* 1 AS(Acoustic Sensor)와 PD발생점간의 실제거리

* 2 V는 유중음속이므로 Oil의 온도가 15(°C)일때 1450(m/s)

* 3 상대오차[%] = $\frac{(\text{측정거리} - \text{실제거리})}{(\text{실제거리})} \times 100[\%]$

착함으로서 부분방전의 유무와 그 정도를 파악할 수 있으며 연속적으로 측정하여 기록 및 감시함으로써 부분방전 진행상태를 쉽게 판별 가능하게 되어 변압기 예방진단의 한 Factor로 이용 가능하다.

4) 개발 제작한 측정장치는 자기 진단법과 5052PR(Pulse and Receiver) 및 Hipotronics사의 부분방전 측정장치등을 이용하여 성능 Test를 실시하였고, 사례 연구를 통하여 오차가 거의 4-5[%]이내로 정확한 위치 탐지가 가능하였다.

차후 연구 과제로서 본 연구의 결과는 실험실에서 모의 변압기를 통하여 얻은 결과이므로 우선 실험실에서 실변압기의 실증 실험을 거친 후 현장적용 시험으로 이어져야 한다. 또한 현재의 Analog 신호처리를 Digital화하여 상시 감시 진단장치의 형태로 발전되어야 할 것이

참 고 문 헌

- 1) J. G. Anderson, "Ultrasonic Detection and Location of Electric Discharge in Insulation Structures", AIEE TRANS., VOL. 75. No. 3 pp. 1193-1198, December 1956.
- 2) J. H. Carpenter, J. S. Kresge, C. B. Musick, "Ultrasonic Corona Detector in Transformer" IEEE on Power Appartus and System Vol. PAS-84 pp. 647-651, August 1965.
- 3) A. A. El-Sulaiman, M. I. Quresh, "Quasi-Steady and Burst Current in Aged Transformer Oil under High Direct Field" IEEE Trans. Elect. Vol. EI-16, No. 5. pp. 435-457, Pct. 1981.
- 4) E. Howell, E. T. Norton, "Location of Partial Discharge Sites in On-line Transformers", IEEE T-PAS, Vol. PAS-100, No. 1. pp. 158-161 Jan. 1981.
- 5) H. Kawada, M. Honda, T. Inoue, T. Amemiya, "Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer", IEEE T-PAS, Vol. Pas-103, No. 2, Feb. 1984.
- 6) 박희로, 김재철, 권태원 외, "개선된 초음파 방법에 의한 변압기내 부분방전 위치 검출" 1988, 대한전기학회 추계종합 학술대회 논문지, 88-E-11, pp. 252-257, 1988. 11.
- 7) 박희로, 김재철, 권태원, 윤용범, 한민구 외, "전력기기 예방진단 기술연구", 1988. 12. 한국전력기술 연구원.