

초음파 측정에 의한 변압기내 부분방전 위치측정

곽희로* 전희중* 김재철* 황선주^① 윤용한* 권태원** 윤용범**
*승실대학교 전기공학과 ** 한국전력 기술연구원

Location of Partial Discharge in Oil Transformer by means of Ultrasonic measurement

H.R. Kwak, H.J. Jeon, J.C. Kim, S.J. Hwang, Y.H. Yoon (Soong Sil Univ.)
T.W. Kwon, Y.B. Yoon, (Research Center KEPCO)

Abstract

This paper described an instrument for the detection and geometric location of partial discharge(PD) sources in oil transformer. This instrument measures electric current pulse and ultrasonic pulse simultaneously in order to determine the geometric location of PD in transformer. Laboratory experiment systems are made for detection and location of PD in oil transformer. It was observed that there are effects of the barrier, such as insulation papers, silicon steel plate and actual transformer with location and detection of PD in model transformer.

Through the laboratory actual test, it was clarified that this measurement device could be used satisfactorily for location of pd in oil transformer.

I. 서 론

경제성장과 더불어 전력수요는 날로 증가되며 이에 수반되어 전력계통은 크게 확장되고 전력기기는 초고압화, 대용량화하는 추세로 가고있다. 또한 계통이 확장됨에 따라 계통사고도 증가하며 그중 특히 대용량화된 변압기의 사고는 정전구역이 넓고 공급지장 및 복구에 따른 경제적 손실과 정전으로 인한 생산 차질의 영향 및 사회에 미치는 심리적 영향이 크기 때문에 고 신뢰도 운전을 위한 전력용 변압기 상시감시와 사고의 미연방지를 위한 예방진단 기술이 더욱 더 요구되어지고 있다. 세계 각국에서는 1960년대부터 지속적인 연구와 예방진단 기기의 개발이 진행되고 있으며 상당히 많은 기술이 축적되어 실용화 단계에 있으나 국내실정은 초보단계에 지나지 않는 실정이다.

이와 관련된 외국의 예를 보면 1956년 J. G. Anderson[1]에 의해 부분방전 특성 및 위치측정법에 관한연구를 시작으로 E. Howells[2], R. T. Harrorid는 기름속에서의 부분방전의 특성, 음속에 대한 관련 이론의 연구를 수행 하였고, E. Hiironniemi, H. Kawada[3]에 의해 부분방전의 자동감시 기록 장치가 개발 되었으나 현장의 잡음 때문에 운전중인 변압기의 예방진단 방법으로 실용화 되지는 못했다.

그러므로 본 논문에서는 잡음의 영향을 용이하게 제거할 수 있는 부분방전 위치측정법을 초음파 센서와 Rogowski Coil을 이용하여 부분방전 위치측정 장치를 제작[4][5] 하였고 제작한 부분방전 위치측정 장치의 현장적용의 신뢰성을 높이기 위해 다음과 같은 실험을 수행 하였다.

- o. 전기적 신호 검출을 위한 로고스키 코일 적용 가능성 검토.
- o. 부분방전 위치 측정시 절연지, 코아 및 권선의 영향 검토.
- o. 실변압기를 장벽으로 부분방전 위치검출.
- o. 실변압기에 직접 부분방전을 발생시켜 위치검출

실험결과 실변압기내 부분방전 발생 위치의 검출이 가능함을 확인 하였고 현장에서 실제 적용가능한 실험 기법과 전력기기의 사고예방진단의 방법을 제시 하였다.

II. 실험장치의 구성

II-1. 측정원리

변압기에 있어 내부의 전계분포가 균일하지 않은 경우 전압을 인가 했을때 인가 전압이 증가하여 어떤전압 이상이 되면 전계가 집중된 부분에서는 부분적으로 방전이 일어나게 된다. 이러한 방전을 부분방전(PD : Partial Discharge)이라 하며 이는 전력기기 설계시 전계의 명형을 맞추지 못했을 때는 물론 권선의 돌출부분 제거가 불충분하거나 금속등 유전율이 큰 물질의 유입, 불충분한 진공 주유나 절연물의 열화에 의해 발생하는 기포등에 의해 그 부분의 전계가 상대적으로 높아짐에 따라 발생한다.

본연구에서 제시한 부분방전 위치측정법은 부분방전 발생시 전기적교란(Electrical Disturbance)로 인하여 생성된 전기신호(ES:Electrical Signal)와 초음파교란(Ultrasonic Disturbance)으로 생성된 음향신호(AS:Acoustic Signal)를 검출하여 검출 시간 차이를 이용 부분방전 발생 위치를 찾는 방법이다.

음향신호는 매질에 따라 전파속도가 다른데 부분방전 발생 지점에서 음향신호 탐촉자(Acoustic Transducer)까지 거리는 식 (1)과 같다.

$$D[m] = V[m/sec] \times (AS - ES) [sec] \dots\dots (1)$$

여기서,

- D : 부분방전 발생점에서 음향신호 탐촉자 까지 거리 [m]
- V : 변압기유에서 음향신호의 속도 [m/sec]
- AS : 음향신호 도달시간 [sec]
- ES : 전기신호 도달시간 [sec]

와 같다.

II-2. 실험장치의 구성

본 연구의 수행을 위한 실험장치는 세부적으로 나눌수 있다. 첫째로, 실험에 필요한 고전압을 발생시키는 고압발생부, 여러 용용실험을 실시할 모델 변압기부 그리고 실험에 필요한 자료 수집및 제어를 수행할 검출부로 나뉘어 진다. 실험장치의 전체적인 구성을 그림 2-1 에 나타 내었다.

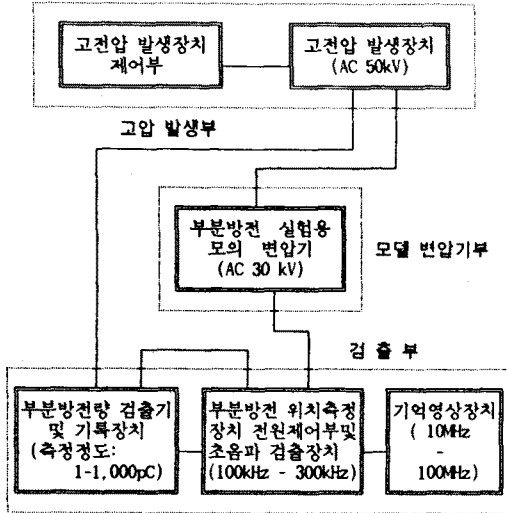


그림 2-1. 부분방전 위치검출을 위한 실험 장치 구성도

II-3. 실험 방법

실험에 앞서 실험장치의 정상적인 동작여부를 확인하기 위해 자체 제작한 초음파 발생기를 모델변압기 내부에 두고 초음파를 발생시켜 실험장치의 상태를 확인한 후 실시한다. 특히 실험시 인가전압은 고압 이므로 항상 유의 하여야 한다.

먼저 고압발생기의 전압을 서서히 증가시켜 부분방전이 발생 될 정도의 전압(본 실험시 보통 8 - 12 [kV])을 인가하고 부분 방전 발생에 따른 전기신호와 음향신호를 관찰 기록한다.

전기신호의 검출은 실제 현장적용 가능성의 검토를 위해 고주 파 대역(100-500[kHz])에서 선형성이 강하며 고감도의 C. T. 인 PEARSON ELECTRONICS사의 Model NO. 4100 Rogowski Coil을 이용 검출 하였다. 그림 2-2.에 부분방전 발생시 HIPOTRONICS사의 PD Detector 에서 검출한 전기신호와 Rogowski Coil을 이용 검출한 전기신호를 비교 하였다.

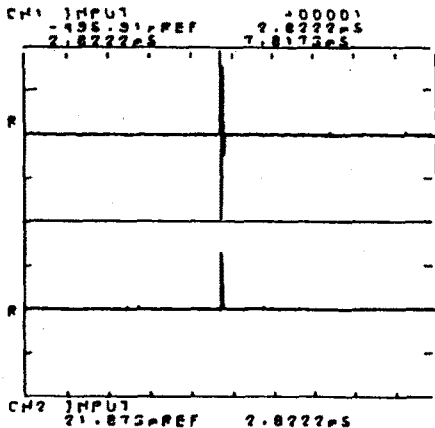


그림 2-2. 부분방전 발생시 PD Detector(위)와 Rogowski Coil(아래) 에서 측정한 전기신호의 비교

그림에서 볼 수 있듯이 두경우의 신호 검출이 같은 시간대에 이루어 졌음을 볼때 PEARSON ELECTRONICS사의 Rogowski Coil을 이용 하는데는 별 문제가 없으리라 본다. 또한 음향신호의 검출은 공진주파수가 0.5[MHz] 정도인 VERNITRON사의 PZT-5A 압전 소자를 사용한 음향신호 탐촉자를 부착시켜 측정 하였고, 이 경우 신호들은 미세한 신호들이므로 잡음(Noise)의 영향 감소를 위한 고감도 필터(Filter)와 증폭기, 그리고 신호계급회로를 사용하여 부분방전 위치측정의 신뢰성을 높였다[6].

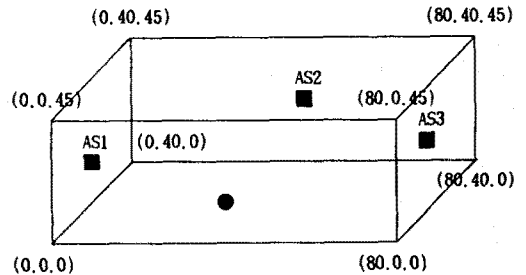
III. 사례연구 및 결과검토

본 사례연구 에서는 실제적용 가능성의 진단을 위해 두가지 경우로 나누어 실험을 실시 하였다. 첫째, 부분방전 발생위치 측정을 위한 음향신호 검출시 장벽(barrier)의 영향을 고찰 하였고, 다음단계로 실변압기에 직접 전압을 인가한후 부분방전 발생위치를 추정하여 실제용 가능성을 검토 하였다.

III-1. 장벽을 고려한 부분방전 위치검출

본 사례연구 에서는 모의 변압기내의 장벽으로 구조강판과 절연지를 사용 부분방전 위치 측정실험을 수행하였다. 모의 변압기(가로 80[cm] ×세로 40[cm] ×높이45[cm]) 내에 침 대 평균 전극을 설치하고(42.8 × 15.5 × 18), 변압기 외벽 세군대에 음향신호 탐촉자를 부착하여 장벽의 영향을 고찰 하였다.

이와 관련된 부분방전 발생위치와 음향신호 탐촉자의 위치는 그림 3-1, 3-2와 같다.



■ : 음향신호 탐촉자의 위치 ● : 부분방전 발생위치

그림 3-1. 모의 변압기에서 부분방전 및 음향신호 탐촉자 위치

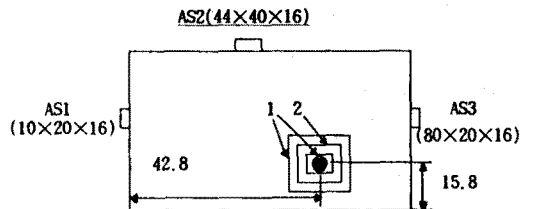


그림 3-2. barrier를 설치했을 경우 모의 변압기 평면도 1 : 절연지 2 : 구조강판

실험결과 barrier가 절연지일 경우 AS2에서 측정된 신호를 그림 3-3.에 나타내었다. 이경우 부분방전 발생위치에서 음향신호 탐촉자 까지의 실제거리는 0.245[m]이고, 실제값과의 비교를 위해 측정된 거리를 계산해 보면

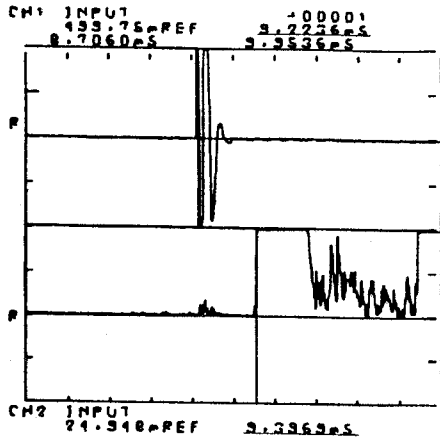


그림 3-3. 전기신호(ES : 9.2236[msec]) 및 음향신호(AS : 9.3696[msec])

$$\begin{aligned}
 D [m] &= (AS[sec] - ES[sec]) \times V(1,450[m/sec]) \\
 &= (9.3696 - 9.2236) \times 10^{-3} [sec] \times 1,450[m/sec] \\
 &= 0.2513 [m] = 25.13 [cm]
 \end{aligned}$$

가 되며, 실제 거리에 대한 오차를 계산하면

$$\begin{aligned}
 \text{상대오차} &= \frac{\text{측정거리} - \text{실제거리}}{\text{실제거리}} \times 100 \\
 &= \frac{0.2513 - 0.2450}{0.2450} \times 100 = 2.57 [\%]
 \end{aligned}$$

가 된다.

부분방전발생위치		PDL			
음향신호 탐촉자 NO.		AS1	AS2	AS3	
부분방전발생점과 센서간의 실제거리 D[cm]		42.8	24.5	39.5	
실제거리에 따른 시간 [ms] Td = D/V		0.2952	0.1690	0.2724	
측정결과에 의한 시간과 거리	no barrier	시간 [ms]	0.2832	0.1685	0.2930
		거리 [cm]	41.06	24.43	42.48
	barrier (절연지)	시간 [ms]	0.3051	0.1733	0.2979
		거리 [cm]	44.24	25.13	43.19
	barrier (규소강판)	시간 [ms]	0.3052	0.1782	0.3125
		거리 [cm]	44.25	25.84	45.31
실제거리와 측정거리에 의한 상대오차 [%] (단, no barrier 고려)		4.07	0.29	7.54	
#. V:유증음속으로 oil온도가 15[°C]일때 1,450[m/sec]					

표 3-1. 장벽을 고려한경우 부분방전 위치 검출 결과

실험시 약간의 측정감도의 저하와 사각박스에 대한 진동현상 등이 보였으나 전체적인 실험결과(표 3-1)에서 볼 수 있듯이 오차 범위가 10[%] 미만으로 부분방전 위치 측정에는 큰 어려움이 없으리라 사료된다.

III-2. 실변압기를 장벽(barrier)으로 이용한 부분방전 위치측정

본 사례연구에서는 모의 변압기내의 장벽으로 실변압기를 이용한 부분방전 위치측정시 영향을 고찰 하였다. 장벽으로 사용된 실변압기는 3[kVA], 단상 내철형으로 외함으로부터 분리한 변압기 본체를 모의변압기내에 설치하였고, 실험 결과의 정확성을 위하여 변압기 외벽에 설치한 음향신호 탐촉자의 갯수를 한개 추가하여 모두 네곳에서 음향신호를 검출하였다. 또한, 음향 신호의 반사를 막기 위하여 모의변압기 내벽을 절연지로 처리 하였다. 실험을 위한 부분방전 발생 위치와 음향신호 탐촉자의 위치는 그림 3-4, 와 같다. 실험의 결과 음향신호 탐촉자 AS2에서 측정된 전기신호와 음향신호를 그림 3-5.에 나타내었다.

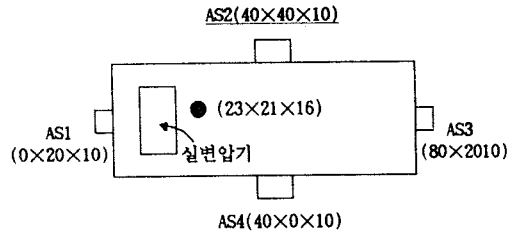


그림 3-4. 부분방전 발생위치 및 전기신호 탐촉자의 위치

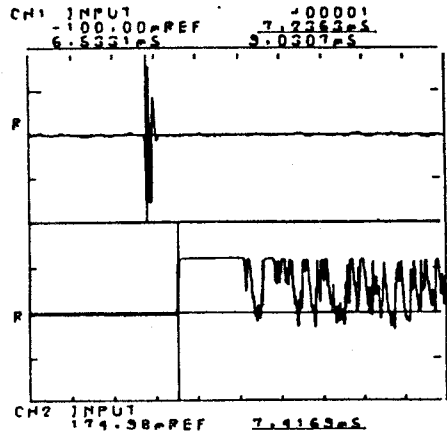


그림 3-5. 전기신호(ES : 7.2363[msec]) 및 음향신호(AS : 7.4169[msec])

실변압기를 장벽으로 하여 변압기 내부와 유사한 조건을 만들어 실험한 결과(표 3-2), 어떤 특정 위치에서는 오차가 문제시 되기는 하였지만 전체적으로 보면 4[%] 정도로 실험허수를 증가시키면 실제 적용에는 큰 문제가 없으리라 본다.

부분방전 발생위치	P D L				
	ASI	AS2	AS3	AS4	
음향신호 탐촉자 No.					
부분방전 발생결과 센서간의 실제거리 D[cm]	23.79	26.19	57.32	27.68	
실제거리에 따른 시간[ms] $T_d = D/V$	0.164	0.1875	0.3953	0.1908	
측정결과에 의한 시간과 거리	시간[ms]	0.1587	0.1806	0.3858	0.1709
	거리[cm]	23.01	26.187	55.94	24.78
실제거리와 측정거리에 의한 상대오차 [%]	3.28	0.01	2.4	10.5	

표 3-2. 실변압기를 장벽으로 이용한 경우 위치측정 결과

III-3. 실변압기에 전압을 인가한 경우 부분방전 위치측정

본 사례 연구에서는 모의 변압기내의 실변압기 고압측 단자에 직접 전압을 인가하여 부분방전의 위치를 추정하는 실험으로서 두부분으로 나누어 실험을 수행하였다. 첫번째 실험은 부분방전의 위치를 알지 못하는 상태에서, 실변압기 고압측 단자에 (+) 전압(9kV)을 인가하고 실변압기 철심지대를 접지한 상태에서 부분방전 발생시 측정된 전기신호와 음향신호로 부분방전이 발생한 위치를 추정하였고, 다음 단계로 부분방전이 발생한 위치로 추정되는 지점의 발생원인을 제거한후 정확한 위치를 추정 하오는지 확인하기 위해 실험을 반복하여 부분방전의 발생 여부를 관찰하였다.

실험에 사용된 실변압기와 음향신호 탐촉자의 위치를 그림 3-6.에 나타내었고, 결과를 표 3-3.에 나타내었다.

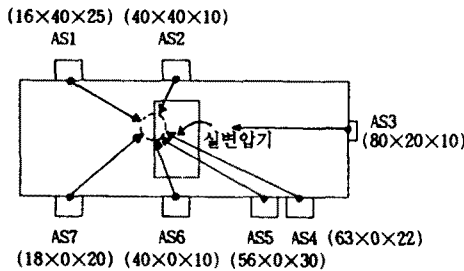


그림 3-6. 실변압기에 전압을 인가한 경우 음향신호 탐촉자의 위치

음향신호 탐촉자 No.	전기 신호 ES [ms]	음향 신호 AS [ms]	측정결과에 의한 거리[cm]
AS1	1.9702	2.2460	33.99
AS2	5.2514	5.4760	32.57
AS3	7.3657	7.6586	42.47
AS4	4.7558	4.9096	22.30
AS5	3.9184	4.1601	35.05
AS6	5.6616	5.9277	38.58
AS7	2.0996	2.3974	43.18

표 3-3. 실변압기에 전압을 인가한 경우 결과

표 3-3.의 결과를 토대로 식(2)를 이용하여 공간상의 좌표를 얻은 결과 부분방전 발생위치는 실변압기의 탭과 철심 사이라는 것을 추정할 수 있었다. 추정된 결과의 확인을 위하여 탭과 철심사이에 절연지를 삽입하고 같은 실험을 되풀이한 결과 부분방전이 발생하지 않는것으로 미루어 부분방전의 정확한 위치를 추정한 것으로 사료된다.

본 사례연구에서 볼 수 있듯이 다수의 음향신호 탐촉자로 많은 실험치를 얻는다면 식(2)를 이용하여 비교적 정확한 부분방전 발생위치를 추정할 수 있음을 관찰할 수 있었다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N ((X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2 - D_i^2)^2 \dots (2)$$

여기서 N은 측정 회수

- X_i, Y_i, Z_i : i번째 측정시 측정점의 위치 좌표
- X_0, Y_0, Z_0 : 부분방전 위치좌표
- D_i : i번째 측정시 측정거리 = (AS - ES) × V
- V : 음속
- AS : i 번째 측정시 음향신호 도달시간
- ES : i 번째 측정시 전기신호 도달시간

IV. 결론 및 고찰

본 연구에서 사용된 음향위치 측정장치를 활용하여 부분방전 발생 위치측정시 얻은 결론 및 향후 연구시 고려사항은 다음과 같다.

- 1) 모의 변압기에서 절연지와 규소강판으로 만든 barrier의 영향을 검토한 결과 일부 감도저하와 진동현상은 다소 있으나 실험실에서 부분방전의 위치를 찾는다는 별 어려움이 없었다.
- 2) 모의 변압기내에 실변압기의 권선을 barrier로 한 부분방전 위치측정은 거의 대부분 검출이 가능하였으나 위치측정 오차는 조금 증가한 편이다. 따라서 음향 측정 위치를 증가시킴으로써 오차를 줄일 수 있었다.
- 3) 실변압기를 적용한 사례 연구에서는 실제 부분방전 위치검출을 수행한 결과 실험치와 실속치가 거의 일치함을 볼 수 있었고, 이를 통해 현장적용의 가능성을 제시 하였다.
- 4) 전기신호의 검출 기능을 높이기 위하여 Pearson Electronics 사의 4100 Rogowski Coil을 사용하였으며 관련 신호처리장치를 보완 하였다.
- 5) 자체 제작한 장비의 현장적용을 위하여는 Noise제거, 보호 회로및 부대 장치가 부과된 현장용 장비개발이 필수적이며 측정 을 용이하게 하기 위하여 Analog측정신호의 digital화 및 신호 처리 장치도 아울러 개발 되어야 한다.
- 6) 실제 현장 적용을 위해 이동이 간편하고, 구성이 간단하며 측정감도가 높은 시스템의 구성이 필요하다. 이를 위해 시스템 회로의 보완과 이에 따른 프로그램의 개발이 필요하다.

V. 참고 문헌

- [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] E. Howells, E.T. Norton "Location of Partial Discharge sites in Online Transformers" IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.1, PP 158-161 January 1981.
- [3] H. Kawada, M. Honda, T. Inoue, T. Amemiya " Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer" IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No.2, February 1984.
- [4] 권태원, 윤용범, 김재철, 광희로, 한민구의 "전력기기 예방 진단 기술연구" 1989.12. 한국 전력 기술 연구원.
- [5] 권태원, 윤용범, 광희로, 전희종, 김재철의 "전력기기 예방 진단 기술연구(관리과제)" 1991.3. 한국전력 기술 연구원.
- [6] J. Michael Jacob, Industrial Control Electronics, Prentice-Hall, 1989.