

개선된 초음파방법에 의한 변압기내 부분방전 위치 검출

'88 추계 학술대회
'88 - E - 14

곽희로 김재철 *조국희(숭실대) 한민구(서울대)
임주일 권태현 윤용범(한국전력 기술연구원)

Improved Ultrasonic Method for Locating Partial Discharges in Transformers

Hee-Ro Kwak Jae-Chul Kim *Kook-Hee Cho(Soong Sil UNIV.) Min-Koo Han(Seoul Nat.UNIV.)
Ju-Il Lim Tae-Won Kwan Young-Beum Yoon (Research Center KEPCO)

Abstract

This paper describes an improved technique for locating partial discharge sites within operating transformers by ultrasonic method which utilizes the different travel times of the electrical and ultrasonic signals produced by partial discharges to determine the location of the sources. The technique was to develop the measurement system based on the enhancement of the acoustic emission signals using signal square circuit to improve the detectable sensitivity and reliability. Also an ultrasonic pulse generator was designed and made to transmit periodically pulses equivalent to partial discharges and to check the good performance of the system, echo effects and self-diagnosis. Through the laboratory work, it was confirmed that the system and the generator can be used satisfactorily for diagnosing power transformers and for studying echo effects and self-diagnosis of the system.

1. 서 론

경제 성장과 더불어 전력 수요는 날로 증가되며 여기에 수반되어 전력계통은 크게 확장되고 전력기는 초고압화, 대용량화하는 추세로 가고 있다. 또한 계통이 확장됨에 따라 사고도 많아지는데 그 중 특히 대용량화된 전력용 변압기의 사고는 정전 구역이 넓어 공급지장 및 복구에 따른 경제적 손실과 사회에 미치는 영향이 크기 때문에 고 신뢰도 운전이 요구되고 있다. 따라서 고 신뢰도 운전을 위한 전력용 변압기의 예방진단은 더욱더 중요한 위치를 점하게 되었으며 세계각국에서도 지속적인 연구와 기기 개발이 진행되고 있다.

변압기의 예방 진단은 부분방전법, 유증가스 분석법, 역률 측정법 및 저압서지 시험법등이 있으나 진단방법의 특성 및 신뢰성과 현장설치 상태에서 진단을 고려할 때 어느 한 방법으로는 불충분하므

로 여러진단 결과의 종합 분석이 필요하다.

변압기 예방 진단 방법중 가장 중요한 방법중 하나이며 현장에서 적용하기쉬운 부분방전 음향 위치 측정법은 1956년 J.G.Anderson [1] 에 의해 본격적으로 연구가 시작되었으며 J.H.Carpenter[2], J.P.Vora [3], M.Train [4]등의 연구에 의하여 음향 측정법으로 부분 방전의 측정 및 위치 판별이 가능함을 보여 주었다.

그리고 E.Howells [5,6,7], R.T. Harrold [8]는 기름속에서 부분방전의 특성, 음속에대한 관련이본 연구 및 외부잡음등에 대하여 연구를 행하였고, E.Hiironniemi [9], H.Kawada [10]에 의하여 부분 방전의 자동 감시 기록 장치가 개발되어 변압기 예방진단에 상당한 공헌을 하였다. 그러나 이들장치도 감도가 낮고 외부에서 발생하는 충격파 잡음 구별의 곤란등 아직 실제 적용에는 많은 어려움이 있다.[11]

본연구에서는 감도가 높고 정확한 부분방전 측정을 위하여 자체 제작한 초음파 센서를 이용한 부분방전 위치 측정장치와 Hipotronics사의 부분방전 전기 측정 장치를 결합하여 모형 변압기내에서 부분방전량 측정 및 부분방전 위치 측정을 행하였고 정확한 결과 분석을 위하여 메모리 스크프, Signal Analyzer 와 X-Y기록기(X-Y Recorder)를 이용하였다.

변압기 유증 온도에 따른 음속변화 실험, 부분방전 위치 측정장치 및 음향 측정 탐촉자의 검증을

위하여 초음파 발생 장치를 만들어 실험을 행하였으며 또한 측정 감도를 높이기 위하여 신호 제곱회로를 채택 하였으며 150 - 200[PC]의 낮은 값에서 측정 오차가 1 - 2[%]정도 지나지 않는 좋은 결과를 얻었다.

2. 실험 장치 및 방법

운전중인 변압기의 내부에서의 부분방전은 설계시 전계의 불평형 부분이 있을때, 전기 충전부분 처리 미숙으로 물출부가 존재하거나 불충분한 진공주유 또는 금속등과 같은 높은 유전물질의 유입이나 장시간 사용으로 인한 절연물의 열화등에 의한 기포에 의하여 그 부분의 전계가 상대적으로 높아짐에 따라 발생한다. 부분방전시 여러 화학적 반응에 의한 고 에너지 전자나 이온의 계속적 충돌에 의하여 절연물의 수명을 단축 시키므로 부분방전의 초기 발견 및 그 위치를 찾는것 또한 중요하다. 즉, 변압기 외함부근이 아닌 권선에서 부분방전은 상대적으로 훨씬 치명적이기 때문이다.

운전중인 변압기에서 부분방전 측정은 유중에 녹아있는 Gas분석 및 전기신호 측정법, 음향위치법등이 있다. 음향위치법은 부분방전의 정확한 크기는

알 수 없지만 위치를 찾을 수 있는 유일한 방법이며 측정원리는 다음과 같다. 즉 변압기 내부에서 부분방전이 발생 했을때 방전시 충격파가 방출되어 유중에 전달되어지며 이 충격파는 변압기 외벽에 일부는 전달되고 일부는 반사되어 진다. 이 충격파는 변압기 외함에서 압전소자를 사용하여 측정할 수 있다. 따라서 부분방전시 발생하는 전기 신호와 압전소자에서 측정된 음향 신호의 전달시간 차에다 초음파 유중전달 속도를 곱하여 얻은 거리를 이용하여 위치측정이 가능하다. 또한 부분방전시 발생하는 초음파의 주파수 대역은 E. Howells[5,6], H. Kawada[10]에 의하여 150[KHz]- 230[KHz]임이 밝혀져 본 연구에서 여기에 맞는 센서의 선택 및 Filter를 제작하였다.

2-1 실험 장치 구성

부분방전 위치를 측정하기 위한 실험장치의 구성은 고압 발생 및 제어부, 모의변압기, 전기신호 측정장치, 음향신호 탐촉자, Pre-Amp, 필터(Filter), 주 증폭기(Main Amp), 신호 제곱회로, 메모리 스크린, 신호 분석기, X-Y 기록기로 되어 있으며 그 개략도는 그림 1과 같다.

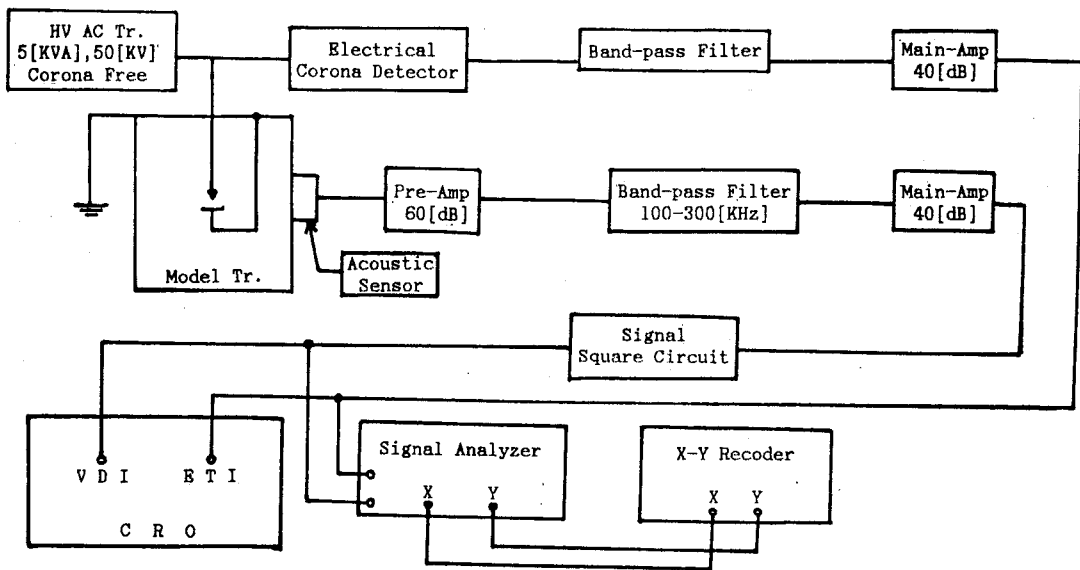


그림 1. 부분방전 위치 측정장치의 개략도

개선된 초음파 방법에 의한 변압기내 부분방전 위치 검출

고압발생 및 전기신호 측정은 Hipotronics 사의 부분 방전 측정장치인 모델 No 750 - 5CF와 CDO - 77A1을 이용하였다.

모의 변압기 제작은 대형변압기와 거의 유사한 특성을 갖도록 제작하였다. 그 크기는 40[cm] x 80[cm] x 63[cm]이며 모의 변압기만을 볼 수 있도록 창(ϕ :11[cm])을 부착 시켰으며 내부에는 부분방전을 발생시키는 집과 평판전극이 쉽게 이동할 수 있도록 구성하였다. 또한 기름의 온도 상승 및 제어를 위한 히타와 온도 제어 장치와 기름순환을 위한 순환장치를 부착하였다.

음향 신호 탐측자의 압전소자는 공진 주파수가 0.5[MHz]인 Vernitron사의 PZT-5A를 이용하여 초음파 신호를 측정 하였다. 음향 신호 탐측자의 구성은 압전소자의 보호와 적절한 계동 효과를 얻기 위하여 동Pipe (길이:5[cm], 지름:2.5[cm])안에 압전소자를 넣고 그 주위에 에폭시(Epoxy) 접착제와 경화제를 1:1 비율로 혼합하여 집어 넣어 제작한 후 변압기 외함 철판 표면에 부착시킬 수 있도록 양쪽에 자석으로 된 보조 지지장치를 만들었다.

Pre - Amp는 음향 탐측자의 신호가 너무 미세하여 이 미세한 신호를 멀리 보낼 경우 외부잡음 때문에 신호와 잡음구별이 곤란하게 되는 것을 막기 위하여 음향 탐측자 바로 뒤에 설치한 예비 증폭기이다.

본 연구에서 Pre - Amp는 콘덴서 결합형으로서 60[dB]의 증폭도를 얻을 수 있도록 구성하였으며 증폭기 각 단마다 표유용량 (Stray Capacity)을 제거하기 위하여 동판 차폐를 하였고 소자들 역시 고품질 것을 사용하여 발전역제 및 만족스러운 S/N비 (Signal to Noise Ratio)를 얻었다. 이 Pre-Amp는 동차폐 상자를 이중 차폐를 하였고 전원도 전원잡음을 줄이기 위하여 건전지를 사용하여 차폐상자안에 넣었다. Pre - Amp에서 나온 음향 전기 신호는 2중 차폐케이블로 주 측정장치로 보내어진다.

음향신호 측정 장치는 필터와 주 증폭기와 제곱회로로 구성하였다. 필터는 부분방전시 발생하는 초음파와 비 또는 눈, ULTC동작, 변압기 자화회로의 잡음 신호등과 구별하기 위하여 대역 통과 필터를

만들었다. 즉 100[KHz]이상의 고역 통과 필터와 300[KHz]이하의 저역 필터를 결합하여 대역폭이 100[KHz] - 300[KHz]가 되도록 만들어 외부잡음을 제거하고 유증의 초음파만 검출할 수 있도록 하였다.

필터는 양호한 전달특성과 안정도가 우수한 Butterworth 필터로서 OP Amp μ A301소자로 구성된 능동 필터이다. 저대역 필터는 차단주파수가 300[KHz]이고 -40[dB/decade]성능을 갖고 있으며 고대역 필터는 차단 주파수가 100[KHz]이고 -60[dB/decade]성능을 갖도록 만들었다.

주 증폭기는 초음파 신호가 음향 센서와 Pre - Amp를 통과하고 필터를 통과한 후에도 아직도 신호 Level이 낮으므로 이 회로를 디지털 회로나 메모리 스킵에 연결을 위하여 좀더 증폭시키고 또 다른 계측기나 다른 System에 접속시 Cable용량에 의한 동작 불안정을 개선하기 위해서도 필요하다.

본 연구에서는 주 증폭기는 전압 Follow형으로 LF 351 OP Amp를 사용하여 3단 증폭을 하였으며 이득은 20-40 [dB]이고 출력 용량 특성은 1000 [PF] 까지 안정하게 동작하도록 하여 상당히 긴 동축 케이블로도 멀리 까지 신호를 보낼 수 있었다.

일반적으로 부분방전량이 적은 경우의 부분 방전시 초음파는 변압기내 초음파의 잔향성분과 기기 자체 소음 및 측정 장치와 외부잡음등의 소음으로 인하여 신호구별이 상당히 어려워 음향위치법을 실제 적용하는데 어려움이 많았다.

본 연구에서는 이러한 어려움을 극복하기 위하여 제곱회로를 보완하여 신호와 잡음구별을 쉽게 하였으며 부분방전량 100 - 150 [PC]에도 측정 가능하도록 하였으며 이 회로는 2SK30A 의 FET와 LF 351 OP - Amp를 사용하여 구성한 결과 측정장치의 신뢰도는 상당히 향상되었다.

3. 실험 및 결과검토

일반적으로 음향측정법 오차는 제질, 크기, 형태에 관련이 있으며, 유증음속과 음향 탐측자의 변압기 외함 부착시 접촉자의 표면 상태에 따라서 변한다.

본 연구에서 음향 탐측자와 변압기 외함사이에 접

측부에는 굴리세린을 발라 완전 밀착이 가능하도록 하여 될수 있는한 오차를 줄이는데 주력 하였다.

실험방법은 모의 초음파 발생장치에 의한 실험과 부분 방전 발생장치에 의한 실험으로 나누어 행하였다. 모의 초음파 발생 장치는 압전소자 양단에 전기신호를 주면 기계적 진동이 일어나는 압전 역효과를 이용하여 부분 방전시 발생하는 초음파와 유사한 초음파를 초음파 발생회로와 압전소자를 이용하여 만들었다.

이 장치로 음향탐촉자, Pre - Amp, 필터, 주 증폭기, 신호계급회로의 회로시험 및 적정동작 여부와 발진상태를 점검하였으며 유중에서 온도 변화에 따른 유속과 감쇠 정도, 변압기 외함에서 반사와 부과 정도 및 초음파의 간향효과에 대하여 실험하는데 이용하였다.

이 초음파 발생회로는 그림 2와 같다.

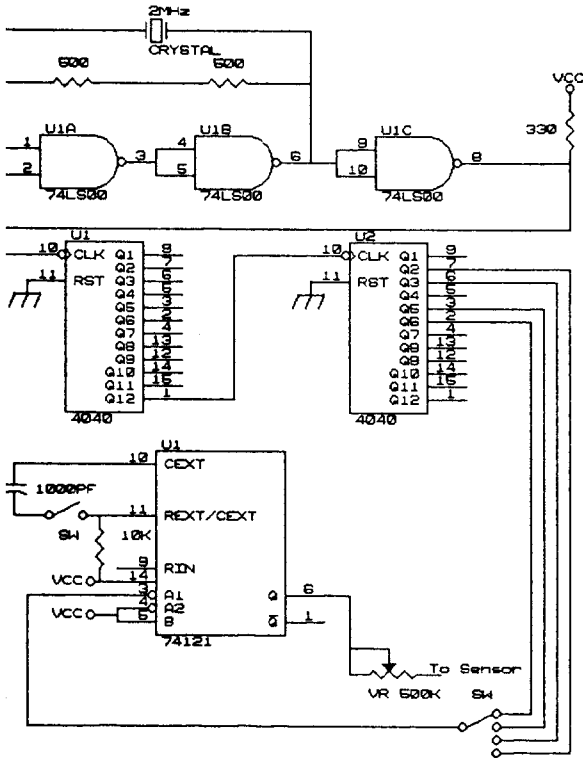


그림 2 초음파 발생회로

3 - 1 초음파 발생장치에의한 유속측정

이 초음파 발생 장치와 음향 탐촉자를 모의 변압기 속에 밀정한 간격을 두고 유온을 상승시켜 가면서 온도변화에 따른 유속을 측정하여 그 결과를 그

림 3에 나타내었다. 이때 초음파 발생장치의 주파수는 143 [KHz]로 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 온도가 상승함에 따라 유속은 늦어짐을 알 수 있다. 본 실험의 결과는 R.Howells[6]결과와 유사하다. 일반적으로 유중에서 유속은 다음과 같은 함수로 표시된다.

$$V(m/s)=f(T,M,SF,G,Vi,Tank\text{의재질, 크기, 형태}) \quad (1)$$

여기서 T는 온도, M[ppm] 수분의 함유량, SF는 신호 주파수, G는 gas량, Vi는 기름의 점도이다.

식 (1) 에서 보는 바와 같이 유속에 미치는 인자는 여러가지이므로 정확성을 기하기 위하여 본 실험에서는 그림3 실험의 결과를 사용하여 부분방전 발생 위치를 구하였다.

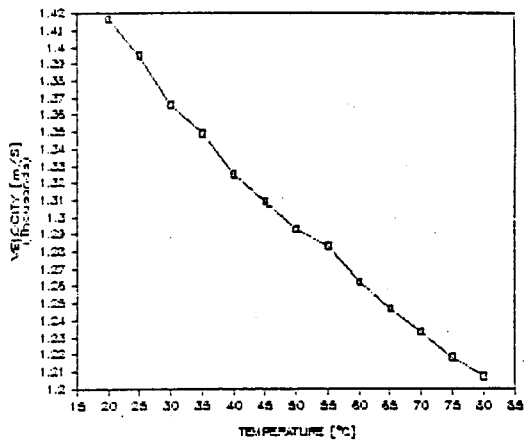


그림 3 온도와 유속과의 관계 (SF=143KHz)

3 - 2 초음파 발생장치에 의한 위치 측정

이 실험은 모의 변압기 내의 초음파의 간향과 제작한 회로의 타당성 검토를 위한 실험이다. 모의 초음파 발생은 진폭이 7[μs]로 주기는 4[ms]마다 한번씩 발생시켜 그 간향효과를 검토 하였다. 측정 한 결과들은 메모리 스크프와 신호분석기(Signal Analyzer)와 X-Y기록기를 이용하여 그림을 그렸으며 그림 4에 그결과를 나타내었다.

그림 4(a)는 초음파 펄스의 전기 신호이며 하단부의 그림 4(b)는 음향신호이다. 그림 4(b)의 결과에서 상당히 많은양의 간향 신호가 있음을 알 수 있다. 물론 간향 신호의 크기는 펄스의 크기와 음향 신호의 전달경로에 따라서 다르지만 부분방전 위

개선된 초음파 방법에 의한 변압기내 부분방전 위치 검출

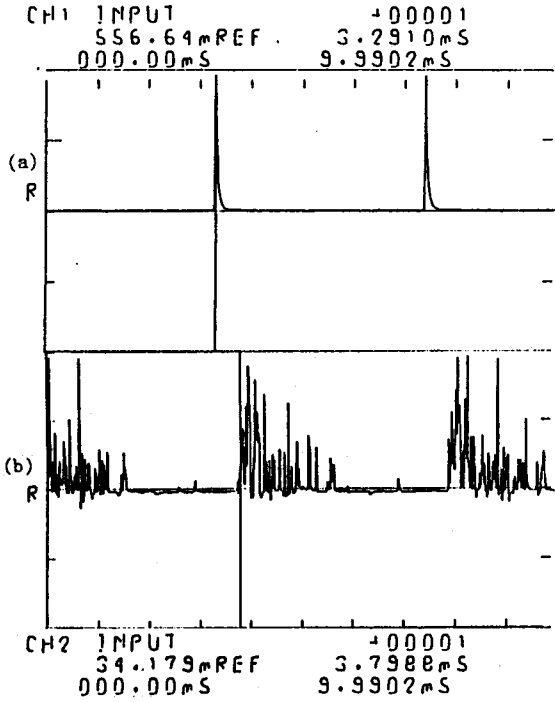


그림 4 초음파 발생장치에 의한 시간차 측정

지 측정시 이 잔향효과 때문에 한 주기에서 처음 발생하는 첫 부분방전 전기신호와 첫번째 음향신호와의 결과를 비교하여야만 정확한 전달시간의 차이를 알 수 있다. 그림 4 결과의 실험시 실험조건은 모의 초음파 발생장치 압전소자와 초음파 탐촉자와의 직선거리는 70[cm]였고 기름 온도는 27 [°C]였다. 그림 4의 상단 우측 두번째는 측정된 전기 신호 도달 시간인 $T_e=3.2910[ms]$ 를 나타내고 하단우측의 맨 끝은 측정된 음향 신호 도달시간인 $T_a=3.7988[ms]$ 를 나타낸다. 이 시간차 즉, $T_a-T_e=0.5078[ms]$ 는 초음파 신호가 모의 변압기 탭크벽에 도달하는 시간이다. 따라서 그림 3의 온도-속도 특성곡선에서 음속 V 는 27[°C]의 경우 1383 [m/s]이므로 초음파 발생지점과 탭크벽에 부착된 탐촉자와의 거리 D 는 $D = V \times (T_a - T_e) = 70.23 [cm]$ 이다. 따라서 이 경우 상대오차는 0.3[%] 정도로 아주 정확하다. 이와같은 초음파 발생장치에 의한 실험을 온도를 올려가며 50여차례 실험하였으나 1[%]-2[%]이내 오차밖에 없었다.

3-3 부분 방전 발생장치에 의한 음향 측정법

모형 변압기 내부 임의의 공간상에 침대 평판 전극을 설치하고 부분방전 발생점과 음향탐촉자의 거리를 42[cm]로 고정시킨 상태에서 고압을 인가해 부분방전을 발생시켰다. 이때 침대 평판 전극은 1.5[cm] 유은은 27[°C] 이때 인가한 전압은 16 - 17 [KV] 정도였다.

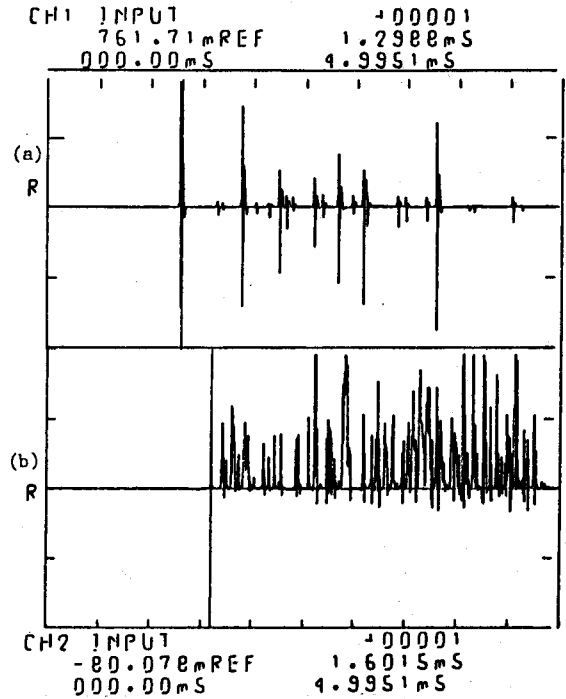


그림 5 부분방전에 의한 시간차 측정

그림 5는 이 경우의 결과를 나타낸다. 그림 5는 그림 4와 마찬가지로 그림 5(a)는 전기신호를 5(b)는 음향신호를 나타내며 반주기 동안에 상당히 많은 부분 방전이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이때 전기신호는 $T_e=1.2988[ms]$, 음향신호는 $T_a=1.6015[ms]$ 이므로 이격거리 D 는 다음과 같다.

$$D = (T_a - T_e) \times V \quad (2)$$

$$= 0.3027[ms] \times 138.3[cm/ms]$$

$$= 41.83[cm]$$

이다. 이 경우 오차도 1[%] 미만 정도로 아주 적었다.

기 발표된 문헌[3-7]의 오차 3-4[%]와 비교하면

성능이 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 본 실험 조건에서 부분방전 측정장치에 의한 부분방전량의 값은 150 [PC]이었다. 음향 측정법에 의한 위치 측정 가능한 부분방전량[4-7]의 최소 크기는 250[PC] - 300[PC] 정도였으나 본 실험에서는 150 [PC] 에서 부분 방전 위치 측정이 가능하였으므로 본 실험 장치의 우수성이 입증 되었다.

따라서 변압기 내부에 존재하는 부분방전 위치를 찾기 위해서는 3개 이상의 음향 탐촉자를 설치 하거나 음향탐촉자의 위치를 3번 이상 바꾸어 가면서 측정하여 삼각 절차법 또는 다음과 같은 식을 이용하여 공간상의 좌표 X_0, Y_0, Z_0 를 찾을 수 있다.

$$\min_{X_0, Y_0, Z_0} \sum_{i=1}^N ((X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2 - D_i^2)^2 \quad (3)$$

여기서 N은 측정회수

X_i, Y_i, Z_i : i번째 측정시 측정점의 위치좌표

X_0, Y_0, Z_0 : 부분방전 위치좌표

D_i : i번째 측정시 측정거리

$$= (T_{ai} - T_{ei}) \times V$$

V: 음속

T_{ai} : i번째 측정시 음향신호 도달시간

T_{ei} : i번째 측정시 전기신호 도달시간

4. 결 론

변압기의 운전상태에서 부분방전의 발생위치를 검출할 수 있는 부분방전 음향위치 측정법에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 신호 제공 회로 도입 및 측정장치 개선으로 음향 위치법의 신뢰도를 향상시킬 수 있었다.
- 2) 100 - 150[PC]의 적은 부분방전 발생위치도 탐지 가능함을 보였다.
- 3) 초음파 발생장치 도입으로 실험 조건에 맞는 정확한 음속 측정이 가능 하였다.
- 4) 초음파 발생장치 도입으로 제작 장치의 자기진단이 가능 하였다.

본 실험은 실험실에서 수행하였으므로 추후 특성을 좀 더 개선한 후 실증 실험을 수행하면 변압기

예방진단에 크게 기여하리라 사료된다. 또한 측정 간편성과 정확성을 위하여 Analog회로를 디지털화 하는 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] J.G. Anderson
"Ultrasonic Detection and Location of Electric Discharges in Insulation Structures" AIEE TRANS., VOL.75 pt.3 pp.1193-1198, December 1956.
- [2] J.H. Carpenter, J.S. Kresge, C.B. Musick
"Ultrasonic Corona Detector in Transformer" IEEE on Power Apparatus and System Vol. PAS-84, pp.647-651 August 1965.
- [3] J.P. Vora, S.L. Foster
"Power Transformers and Corona Testing" IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., January 31-February 5, 1965.
- [4] D. Train, A. Mercier, D. Thorne
"The Detection of Partial Discharge in High Voltage Potential Transformers in Service" IEEE Winter Meeting, New York, N.Y., January 27-February 1, 1974.
- [5] E. Howells, E.T. Norton
"Detection of Partial Discharge in Transformer Using Acoustic Emission Techniques" IEEE Transaction on Power Apparatus and System Vol. PAS-97, No.5, Sept/Oct 1978.
- [6] 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, January 1981.
- [7] E. Howells, E.T. Norton
"Parameters Affecting the Velocity of Sound in Transformer Oil" IEEE Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society for Presentation at the IEEE/PES 1983 Summer Meeting, Los Angeles, California, July 17-22, 1983.
- [8] R.T. Harrold
"Acoustic Waveguides for Sensing and Locating" IEEE Vol. PAS-98 No.2 March/April 1979.
- [9] E. Hiironniemi, J. Takara
"Location of Partial Discharges and Electrical Failures in Power Transformers by means of Automatic Ultrasonic Method" CIGRE 1982 Session 1-9 September
- [10] 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.
- [11] 전력기기 예방진단 기술연구(중간보고서) 1985.1. 한국 전력 기술 연구원