

상호상관을 이용한 변압기내의 부분방전 위치측정

(Measurement of partial discharge point in power transformer using crosscorrelation)

文榮宰* · 具春根* · 鄭讚壽** · 郭熙魯**

(Young-Jae Moon · Choon-Keun Koo · Chan-Soo Chung · Hee-Ro Kwak)

요 약

전력 수요가 증가함에 따라 전력용 변압기의 용량이 커지고, 따라서 변압기사고의 파급효과가 커지게 된다. 본 논문은 전력용 변압기의 절연 열화에 의한 사고를 예방진단하기 위한 부분방전의 초음파 측정 기술을 응용하여, 초음파-초음파 측정법에 대한 부분방전점의 위치검출법을 연구하였다. 정확도를 높이기 위해 상호상관함수를 이용할 것을 제안하였으며 모의변압기에서 실험한 결과 만족할 만한 결과를 얻었다.

Abstract

The larger electrical power demand, the larger power transformer capacity. Therefore following effect of transformer incident getting worse. This paper describe PD point detection by means of ultrasonic-ultrasonic method in order to diagonize transformer accident using application of ultrasonic detecting technique. We offered crosscorrelation function in order to increase accuracy, and got sufficient result from artificial transformer.

1. 서 론

전력설비의 대규모화, 고전압화로 인하여 변압기의 사고 발생시 사고로 인한 파급효과가 크게 증대되었다. 따라서 사고로 인한 영향을 최소화시키기 위해서 고신뢰도의 운전이 요구되고 전력용 변압기의 사고예방진단기술은 점점 중요한 위치를 점하게 되었다.

부분방전은 운전중인 변압기나 GIS등과 같은 전력설비에서 설계시 전계의 불평형부분이 있을

때, 전기충전부분의 처리미숙으로 돌출부가 존재하거나 불충분한 진공주유 또는 높은 유전물질의 유입이나, 장기간 사용으로 인한 절연물의 열화 또는 단락사고에 의한 권선변형으로 그 부분의 전계가 상대적으로 높아짐에 따라 발생한다.^[9] 변압기나 GIS등과 같은 전력설비의 내부에 부분방전이 발생하면 이로 인한 절연물 열화가 발생하므로 사고의 원인이 된다. 따라서 부분방전의 초기발견, 그 진행상태 및 위치를 찾는 것은 사고를 미연에 방지하여 고장으로 인한 파급효과를 최소화하는데 매우 중요하다. 그런데 변압기나 GIS등의 내부에서 부분방전이 발생하면 음파와 초음파가 발생되는데, 음파는 외부소음과 구별이 잘 되지 않으므로 주로 초음파를 이용하여 사고

*正會員：崇實大學校 電氣工學科 大學院

**正會員：崇實大學校 電氣工學科 教授·工博

接受日字：1993年 7月 8日

를 예진하거나 열화위치를 찾는 방법이 연구되고 있다. 변압기내부의 절연이상이 감지되었을때 그 위치를 측정할 수 있으면 수리비용과 수리시간을 절약할 수 있음은 물론이고 절연이상의 진단 신뢰도를 높일 수 있다. 본 논문은 이점에 착안하여 전력용 변압기 내부에서 부분방전이 일어났을 때 초음파-초음파 측정법으로 부분방전이 일어나는 점을 측정하는 방법을 연구하였다.

2장에서는 기존의 부분방전 발생점의 측정법에 대해 검토하였고 보다 정밀성을 향상시키고 자동화 할 수 있는 방법으로 상호상관을 이용한 측정법을 3장에서 제안한다. 4장에서는 3장에서 제안된 방법의 유용성을 검증하기 위하여 모의 변압기를 제작하여 인위적으로 부분방전을 일으키고 외부에서 초음파센서로 측정하는 실험을 한다.

2. 부분방전의 위치측정방법

변압기 진단방법에서 가장 중요한 방법중의 하나이며, 현장에 적용하기 쉬운 음향위치 측정법은 1956년 J. G. Anderson에 의해 본격적인 연구가 시작되었으며, J. H. Carpenter, J. P. Vora, M. Train등의 연구에 의하여 음향측정법으로 부분방전의 측정 및 위치판별이 가능함을 보여주었다. 그리고 E. Howells, R. T. Harrold는 기름속에서 부분방전의 특성, 음속에 대한 관련 이론연구 및 외부잡음등에 대하여 연구를 하였고, [3][7] E. Hiironiemi, H. Kawada등에 의하여 부분방전의 자동감시 기록장치가 개발되어 변압기 예방진단에 상당한 공헌을 하였다.[4][10] 그러나, 이들 장치도 감도가 낮고, 외부에서 발생하는 충격과잡음 구별의 곤란등 아직 실제 적용에는 많은 어려움이 있다.

부분방전의 위치를 측정하는 방법은 크게 전기-초음파 신호측정법[4][5][6]과 초음파-초음파 측정법[1][3][5] 두 가지로 나눌 수 있다.

2.1. 부분방전에 의한 초음파의 특성

전계분포가 균일하지 않은 절연물에 전압을 인가하고 인가전압을 서서히 증가시키면 어떤 전압

이상이 되었을 경우, 전계가 집중된 부분에서 부분적으로 방전이 일어나게 된다. 이러한 방전을 부분방전(PD : Partial Discharge)이라 한다. 유중에서 부분방전이 발생하면 여러가지 화학작용을 수반하며, 고에너지 전자나 이온, H₂를 발생함과 동시에 변압기 유중에 포함되어 있는 산, 알칼리, 황등은 변압기유의 절연내력에 나쁜 영향을 미칠 뿐만 아니라, 다른 절연물 및 금속도 열화시키므로 이들은 당연히 제거되어야 한다. 변압기내에서 부분방전이 일어나면 주파수 150~230[kHz] 정도의 초음파 신호를 발생시킨다.[4] 초음파의 발생원인은 정확히 규명되지는 않았으나 부분방전이 발생한 지점부근에서 국부적인 발열이 동반되고 그 발열열에 의해 주변의 절연유가 급격한 압축을 받아 충격파로 되어 pulse 형태의 초음파를 발생시킨다는 것이 일반적인 견해이다.

초음파 신호로 부분방전점의 위치를 측정하려면 초음파의 진행속도(음속)가 중요하다. 변압기내의 절연유에서 음속에 영향을 주는 요소로는 온도, 수분함유량, Gas, 신호주파수, 점도, 굴절·반사계수등이 있다.

특히 온도에 의한 음속변화가 음속에 가장 큰 영향을 미치며 그림1과 같이 절연유의 온도 증가에 따라 속도가 감소하는 특성을 가진다.[7] 이때 0[°C]~80[°C] 구간에서 대체로 선형 특성을 가지므로 이 때의 기울기 a를 구하면

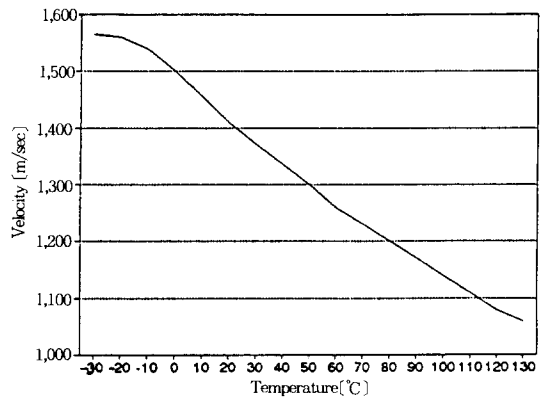


그림 1. 변압기유의 온도에 따른 음속의 변화 (신호 주파수 150[kHz] 기준)

Fig. 1. Velocity versus temperature in transformer oil (signal frequency : 150[kHz])

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{-300}{80} = -3.75$$

를 가짐을 알 수 있다.

즉, 변압기유의 온도를 측정하면 그때의 음속이 결정되고 초음파가 발생한 점에서 센서까지 전달되는데 소요되는 시간이 측정되면 발생점까지의 거리를 계산할 수 있다.

2.2. 전기-초음파 측정법

전기-초음파 측정법은 전기신호를 기준으로 초음파 신호가 도달하는 시점까지의 시간차이로 부분방전의 위치를 계산하는 방법이다. 여기서 기준이 되는 전기신호는 부분방전 발생시의 펄스 형태의 전기신호로서 변압기의 접지선에 설치한 로고우스키 코일(Rogowski coil)로 감지하고, 초음파 신호는 변압기 외벽에 부착한 초음파센서로 감지한다. 전기신호의 속도는 광속과 같으므로 시간뒤집이 거의 없고(1[m] 거리에 3.3[psec]의 시간차) 초음파 신호는 80[°C]의 변압기유에서 1,200[m/sec]^[7]이므로 (1[msec]의 시간차) 양 신호간의 시간차이에 그 온도에서의 유중 초음파 전달속도를 곱하여 그 거리를 산출해 낼 수 있으며 그림2는 이 방법의 개념도이다.

그림2에서 보는 바와 같이 부분방전이 발생할 때 생긴 전기신호가 거의 동시에 Rogowski coil에 감지되고 Δt 시간후에 1의 경로를 거쳐 초음파 신호가 감지될 것이다.

Δt 의 시간차와 이 때의 전파속도의 곱으로 1을 구할 수 있으며, 방전점 P는 센서 A를 원점으로 하고 반지름 1을 갖는 원주상에 존재하게 된다. 센서의 부착위치를 바꾸고 같은 방법으로 또 다

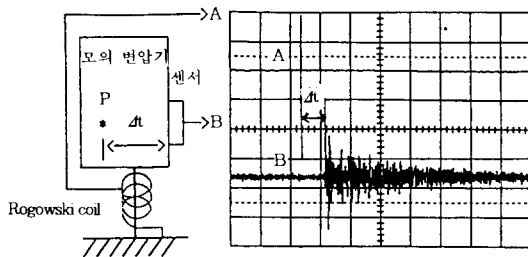


그림 2. 전기-초음파 측정법의 개념도
Fig. 2. The PD position of using electric ultrasonic signal

른 원주를 그려 교점을 구하면 그 교점이 부분방전 발생점 P가 된다.

2.3. 초음파-초음파 측정법

이 방법은 기준이 되는 신호가 초음파이고, 비교대상 신호도 초음파인 방법이다. 이 경우 부분방전이 발생할 때 변압기 외벽의 서로 다른 위치에 부착한 초음파센서로 포착한 초음파 신호 상호간의 시간차로 그 거리를 산출해 내는 방법이다. 그림3에 초음파-초음파 신호법의 개념도이다.

그림에서와 같이 방전점 P에서 A까지의 거리 l_1 경로를 거쳐 초음파 신호가 도달하여 신호가 감지되고 Δt 에 해당되는 시간 Δt 후에는 l_2 경로를 거쳐 센서 B에서도 이 초음파 신호가 감지된다.

Δt 와 전파속도의 곱으로 각각 l_1 , l_2 를 구할 수 있고 방전점 P는 센서 A, B를 정점으로 하는 쌍곡선 궤적위에 존재하게 된다. 즉, P가 존재하는 쌍곡선의 궤적은 거리차 d에 대한 식으로

$$d = |l_2 - l_1| = |\overline{BP} - \overline{AP}|$$

$$= |\sqrt{(b_1 - x)^2 + (b_2 - y)^2} - \sqrt{(a_1 - x)^2 + (a_2 - y)^2}|$$

이 된다.

센서 A, B의 부착위치를 바꾸어 같은 방법으로 쌍곡선 궤적을 그리고, 두 쌍곡선 궤적간의 교점을 구한다면, 이 교점이 방전점 P가 된다.

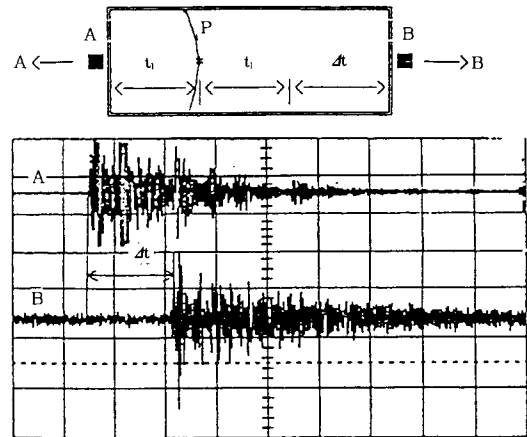


그림 3. 초음파-초음파 측정법
Fig. 3. The PD position measurement of using ultrasonic-ultrasonic signal

2.4. 위치 측정에서의 문제점

그림4는 부분방전에 의한 초음파 신호의 시작부분을 확대한 것이다. 이 때 threshold level을 어떻게 설정하는가에 따라 측정오차가 발생한다. Rogowski coil에 포착되는 전기신호는 거의 완전한 형태의 펄스나 중성접지선의 전류가 상대적으로 상당히 크므로 찾아내기가 쉽지 않고, 외부신호에 의한 잡음, 잔향효과로 초음파신호의 시작점을 판정하기 곤란하며 threshold level설정에 의한 오차를 최소화하는데 장애가 되므로, 프로그램에 의한 시작점의 자동판정을 어렵게하는 요인이 된다.

3. 상호상관을 이용한 위치측정법

3.1. 상호상관을 이용한 거리차계산

앞 장에서 설명한 바와 같이 초음파-초음파 측정법은 시간영역에서의 파형분석만으로는 threshold level의 설정에 따라 시점이 달라지므로 두 센서에 감지된 파형사이의 시간차이를 구하기 곤란하다. 이 때에 두 신호간의 정확한 시간차이를 구하기 위한 방법으로 상호상관법을 본 논문에서 제안한다. 센서 A에서 포착되는 초음파신호와 센서 B에서 포착되는 초음파신호는 모두 하나의 음원에서 발생된 것이므로, 전달경로에 따른 시간지연이나 감쇄의 정도는 다를지라도 같은 주파수 성분으로 구성되어 있을 것이다. 따라

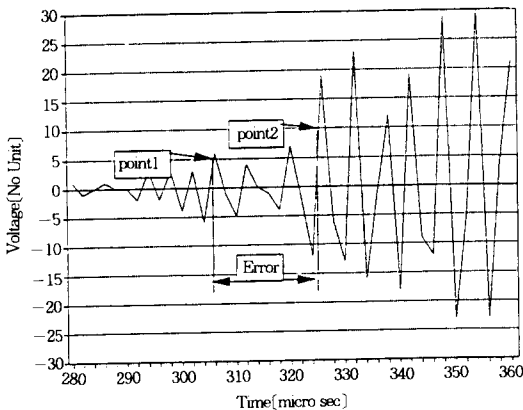


그림 4. 기준레벨 설정에 따른 오차
Fig. 4. Error of threshold level

서, 두 신호의 시간지연의 상호상관을 계산하면 두 신호의 시간지연의 차이에 해당하는 시간차에서 상호상관값이 최대가 된다. 즉, 두개의 신호를 각각 $x(n), y(n)$ 이라고 하면

$$r_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x(n) \cdot y(n-i)$$

로 계산된다. 상호상관 $r_{xy}(k)$ 는 k 가 두 신호의 시간차에 해당하는 k_0 일때 최대값이 되는 성질을 이용하면 문턱전압의 결정에 따라 발생하는 오차의 영향을 받지 않게 되고, 또한 프로그램에 의해 k_0 를 쉽게 찾을 수 있는 등의 장점이 있다.

3.2. 상호상간의 모의 실험

제안한 방법으로 부분방전에 의해 발생한 초음파가 센서 A와 센서 B에 도달하는 시간차를 정확히 측정할 수 있는지를 확인하기 위한 실험을 행하였다. 그림5는 초음파 센서로 감지한 한 부분방전신호의 상호상관을 계산한 값이다.

두 신호간의 시간차는 $600(\mu\text{sec})$ 이었으며, 이 때 상호상관법을 통해 얻은 시간차는 $601(\mu\text{sec})$ 로 $1(\mu\text{sec})$ 의 차이를 보였다. 이는 거리상으로 $1.20(\text{mm})$ 이므로 정확한 값을 얻었다고 보아도 무방할 것이다.

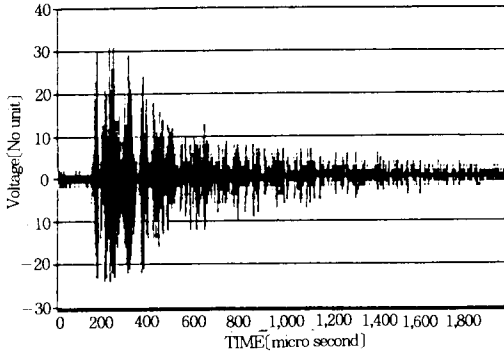
4. 모의 변압기에서의 실험 및 결과

4.1. 실험장치

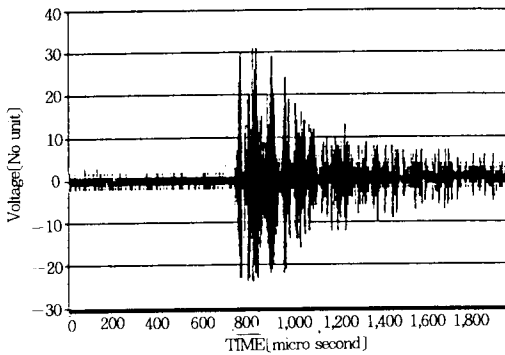
부분방전의 위치측정을 위한 실험장치는 부분방전을 인위적으로 발생시키기 위한 모의 변압기, 이를 감지하기 위한 초음파 센서, 초음파 센서로 감지된 미약한 신호를 증폭시키기 위한 Pre-Amp, Pre-Amp에서 증폭된 신호에서 필요한 주파수 대역만을 얻기 위한 대역 통과 Filter와 Filter를 거친 신호를 다시 증폭하기 위한 Main Amp, 처리된 파형을 저장하기 위한 기억장치와 기억시간을 맞추기 위한 시간회로, 이를 전반적으로 제어하는 개인용 컴퓨터로 구성되어 있다.

기억장치에 저장되는 파형은 일반 단상교류 전원의 한 최대치와 다른 최대치 구간으로 이 구간에서 부분방전이 일어날 확률이 높기 때문이다.^[9]

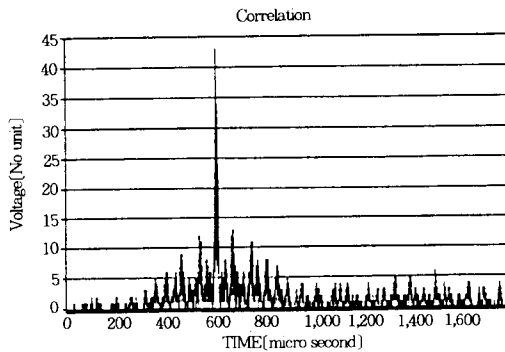
이 부분 동작점을 찾기 위한 장치가 시간회로 부분이다. 기억장치에서 저장된 부분방전의 파형은 일반 개인용 컴퓨터로 읽혀져 상호상관함수가 계산되고 이를 바탕으로 두 음향신호의 시간차를 구하게 된다.



a) 원신호



b) 시간지연된 신호



c) 상호상관파형

그림 5. 동일파형을 시간차를 두고 상호상관시켰을 때의 파형

Fig. 5. The correlation of the same signal with time delay

4.2. 위치 측정 프로그램

센서에서 감지된 신호는 Pre-Amp, Filter와 Main Amp, 기억장치를 거쳐서 개인용 컴퓨터로 입력된다. 입력된 신호는 디지털 신호가 되므로 이를 소프트웨어적으로 처리할 수 있다.

이 정보로 우선 상호상관값을 계산하고 이 값이 가장 큰 샘플링 포인트를 찾게 된다. 이 포인트에 샘플링 시간을 곱하면 두 초음파 신호간의 시간차를 구할 수 있게 된다. 이 시간차를 바탕으로 거리차를 구할 수 있는데, 여기에는 실험 당시의 절연유의 온도에 그 때의 초음파음속을 곱하여 부분방전점에서 두 센서까지의 각각의 거리차를 얻을 수 있다. 그런데, 두개의 센서에서 같은 거리차를 갖는 점은 센서를 촛점으로 하는 쌍곡선이 된다. 이 쌍곡선의 궤적(x, y 좌표값)이 계산되어 화일로 저장되고 이런 궤적화일은 나중에 서로 비교되어 궤적간의 교점을 구하는데 사용된다. 또한 이 화일값은 읽혀져 화면으로 보는데도 사용된다. 이를 위한 프로그램의 흐름선도는 다음과 같다.

4.3. 실험 방법

실험에 사용된 모의 변압기는 가로×세로×높이를 800×400×500[mm]로 제작하였으며, 측정값의 정밀도를 확인하기 쉽도록 직육면체로 제작하였고 내부에 철심이나 코일은 넣지 않았다. 인위적으로 침대 평판전극에서 부분방전이 발생하게 하였으며 방전점의 좌표는 (300, 250, 400)이었다. 모의 변압기 외벽에 초음파센서를 부착하여 신호를 취득하였으며 센서의 높이는 방전점의 높이(400mm)와 같도록 하여 평면상의 문제로 제한

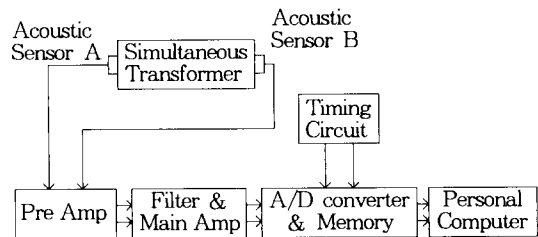


그림 6. 실험장치의 전체적인 구성도

Fig. 6. Block diagram of experimental equipment

하였다. 실제 변압기에 작용할 때는 방전점의 위치를 모르므로 이 방전점을 쓸 수 없으나 2차원에서 3차원공간으로 확장하는 것은 그리 어려운 문제는 아니라고 생각되므로 문제를 단순화시키기 위하여 이렇게 선택하였다.

또한 초음파 신호의 샘플링 속도는 2(MHz)로 하였으며 실험때의 변압기유체의 온도는 25(°C)이었다. 그림8은 센서의 위치와 부분방전점의 위치이다.

4.4. 실험 결과 및 검토

그림8의 A, B센서 부착을 통해 얻은 초음파 신호간의 상호상관함수를 계산하면 상호상관함수가 최대가 되는 시간 K_d 를 구하고 샘플링 주기와 음속을 곱하여 \overline{AP} 및 \overline{BP} 의 차이 d 를 계산하여 표1을 얻었다. 표1에서 알 수 있듯이 방전점과 센서와의 거리의 차이 d 의 측정값의 오차는 1.2~4.09(%)로서 5(%)이내의 값을 알 수 있다.

제한된 횟수의 측정값이지만 이 범위를 크게

벗어나지 않을 것으로 판단된다.

방전이 일어나는 점 P는 일반적으로 두 센서를 잇는 직선상에 있지 않고 두 센서와의 거리차 d 를 만족하는 쌍곡선 상에 있게 된다. 따라서 위의 거리차를 만족하는 쌍곡선 2개의 교점으로 방전점 P를 찾을 수 있고, 거리차가 6개이므로 ${}^6C_2 = 15$ 개의 조합이 가능하다. 표2는 이들 조합으로 방전점 P를 구하여 정리한 것이다.

표2에서 센서 조합 $S_i - S_j$ 는 그림3에서 \overline{AP} , \overline{BP} 와의 거리차 d 와 \overline{AP} 와 \overline{BP} 의 거리차 d_j 를 이용하여 두개의 쌍곡선 함수를 구하고 이들 쌍곡선 함수의 교점으로 부분방전의 발생점 $P(x, y)$ 를 구한 것이다. 표2를 보면 부분방전 발생점 P의 측정값 평균이 (300, 253)(mm)로서 참값 (300, 250)(mm)과는 겨우 3.4(mm)의 오차로 정확

표 1. 두 센서와 방전점사이의 거리차 d(mm)

Table 1. Distance between two sensors and PD point.

구 분	참 값	측 정 값	오차(%)
d1	222.78	214.11	8.67 (3.89)
d2	200.74	192.52	8.22 (4.09)
d3	187.69	185.43	2.26 (1.20)
d4	161.46	164.95	3.49 (2.16)
d5	291.42	302.87	11.45 (3.92)
d6	69.65	71.40	1.75 (2.51)

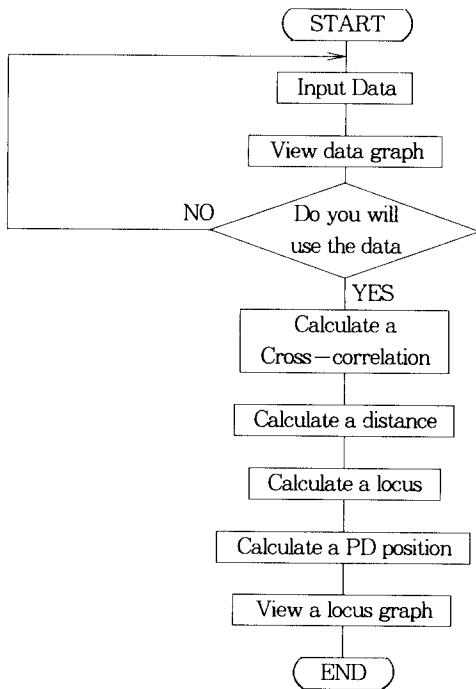


그림 7. 위치측정 프로그램의 흐름도
Fig. 7. Flow chart of PD position measurement

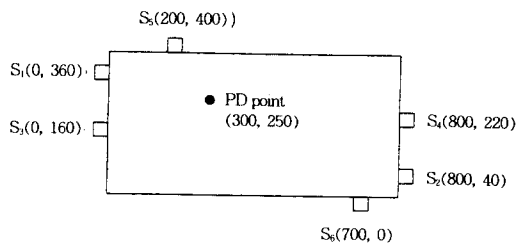


그림 8. 센서의 부착위치
Fig. 8. Allocation of Sensors

히 측정됨을 알 수 있다. 최대오차는 센서조합이 S1-S5의 경우로서 18.4[mm]의 크기를 갖는다. 그러나 실제의 변압기에서 2[cm]의 위치오차는 실용상 문제가 없는 정밀도로 생각된다.

*주: 표2에서 S2-S3, S2-S4 및 S3-S4의 조합이 빠진것은 이 경우 두개의 쌍곡선이 방전점 부근에서 거의 나란히 진행하여 거리차 d의 오차에 매우 민감하게 되므로 측정불능이 되기 때문이다.

5. 결 론

전력용 변압기의 부분방전점의 위치를 정확히

표 2. 부분 방전 발생점의 측정값[mm]

Table 2. Measured value of PD point

센서조합	측정값(x, y)	오차(x, y)	오차 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$
S1-S2	(302, 254)	(2, 4)	4.5
S1-S3	(301, 252)	(1, 2)	2.3
S1-S4	(298, 248)	(-2, -2)	2.8
S1-S5	(307, 264)	(7, 14)	18.4
S1-S6	(300, 251)	(0, 1)	1.0
S2-S5	(301, 259)	(1, 9)	9.1
S2-S6	(302, 250)	(2, 0)	2.0
S3-S5	(300, 257)	(0, 7)	7.0
S3-S6	(301, 251)	(1, 1)	1.4
S4-S5	(298, 254)	(-2, 4)	4.5
S4-S6	(298, 251)	(-2, 1)	2.3
S5-S6	(295, 252)	(-5, 2)	5.3
평균	(300, 253)	(0.1, 3.4)	5.05

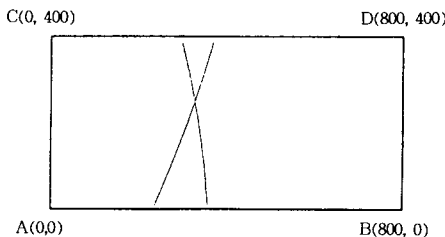


그림 9. 센서 조합이 S1-S3일때의 두 쌍곡선의 궤적
Fig. 9. Locus of Sensor combination pair S1-S3

측정하는 것은 방전량에 의한 변압기의 예방진단의 신뢰도를 높이고 수리시간 단축 및 수리비 절감의 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 종래의 초음파-초음파 측정에 의한 방전점 위치 측정법의 잡음감도를 낮추어서 정밀도를 향상시키기 위하여 상관 함수를 이용한 두 초음파 신호의 시간차를 측정하는 상호상관법을 제시하고 실험에 의하여 그 가능성을 제시하였다. 제시된 상호상관으로 방전점과 두개의 센서의 거리차를 측정 한 결과 1.2~4.1[%]의 오차로 거리차의 측정이 가능했으며, 이를 토대로 평면상에서 방전점의 위치를 계산한 결과, 최저 1.0[mm]에서 최고 18.4[mm]의 오차로 방전점의 위치를 찾을 수 있었으며, 측정값의 평균은 참값에서 겨우 3.4[mm]의 오차를 보일 뿐이었다.

철심이나 코일이 없고, 비교적 외부잡음이 없는 실험실의 모의 변압기에서 행한 실험이었지만 제시된 상호상관을 이용한 방법은 매우 유용한 수단이라고 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) S. L. Jones, "The detection of partial discharge in powertransformers using computer aided acoustic emission techniques", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada June 3-6, 1990
- 2) 전력기기 예방진단 기술연구(최종보고서) 1993. 3. 한국 전력 기술 연구원
- 3) E. Howells & E. T. Norton, "Detection of partial discharge in transformers using acoustic emission techniques", IEEE Transactions on Power Apparatus and System. vol. PAS-97, No. 5. Sept/Oct 1978
- 4) H. Kawada, M. Honda, T. inoue & T. Amemiya, "Partial discharges automatic monitor for oil-filled power transformer", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, vol. PAS-103, No. 2. February 1984.
- 5) 문영재외 5명, "Rogowski Coil과 초음파 센서를 이용한 변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 1990. 7.
- 6) 곽희로, 김재철, 조국희, "개선된 초음파방법에 의한 변압기내 부분방전 위치 검출", Journal of the Institute of Basic Science and the Industrial, Technology Research Institued, Soong Sil University. Vol. 19, 1989.

- 7) E. Howells, E. T. Norton, "Location of Partial Discharge Sites in Oil-filled Transformers", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol PAS-100, No. 1, January 1981.
- 8) John R. Treichler, C. Richard Johnson, Michael G. Larimore, "Theory and design of Adaptive filters", A Wiley-Interscience publication, 1987.
- 9) R. Bartnikas, "Corona discharge processes in voids", Engineering Dielectrics Vol. 1. Corona measurement and Interpretation, American Society for Testing and Materials 1979.
- 10) 久保義昭 외 4명 "變壓器部分放電自動監視裝置の開發とフィード試験", 일본전기학회 고전압 연구자료(자료번호: HV-82-26)
- 11) Richard E. Blahut, "Fast algorithms for digital signal processing", Addison-Wesley publishing company, 1987.