

초음파 신호측정에 의한 변압기내의 부분방전위치측정

문영재*, 정완섭, 정찬수, 좌희로
송실대학교 전기공학과

The decision of position of a partial discharge in power transformer by measurement of ultra sonic signal

Young-Jae MOON*, Wan-Sup CHUNG, Chan-Soo CHUNG and Hee-Ro KWAK
Department of Electrical Engineering, Soong-Sil University

Abstract

Detecting acoustic emission (AE) provides an appropriate method to diagonalize on-line transformers, since acoustic signal is not influenced by strong electric field. Then AE versus AE signal processing method is investigated. But this processing is difficult that decision of starting point of AE wave with acoustic noise. This problem is sloved by correlation which calculate time interval between two signals exactly. This paper presents a technique locating the exact position of the partial discharge (PD) in a power transformer by the correlation of the AE signals from two ultrasonic sensors. And PD position is displayed on monitor. Laboratory tests confirmed that the proposed method can be used for locating the PD in power transformers.

1. 서론

경제가 발전함에 따라 생산과 소비에 관련하여 전력수요가 크게 증가하게 되었다. 이런 전력수요의 증가는 전체적인 발전, 송전, 배전계통의 대규모화, 고전압화를 요구하게 되었고 이로인해 갑작스런 변압기의 사고 발생시 정전구역의 확대, 공급저장 및 복구에 따른 경제적인실과 사회에 미치는 심리적 영향등 배전계통에 연결되어 있는 전력수요자에게 미칠 영향은 더욱 커지게 되었다.

이런 사고로 인한 영향을 최소화 시키기 위해서 고신뢰도의 운전이 요구되고 고신뢰도 운전을 위한 전력기기의 예방진단기술은 점점 중요한 위치를 점하게 되었으며 세계 각국에서도 지속적인 연구와 진단기기의 개발이 진행되고 있다.

특히 배전계통에 관계하는 변압기의 사고를 미리 예방진단하여 사고를 예방하고 한편으로 변압기 사고의 원인이 될 수 있는 부분방전을 그 위치를 찾아 내는 방법이 연구^{[1][2][3]}되고 있다.

우리나라의 경우 345KV나 154KV의 송전선을 거쳐서 발전소에서 변전소까지 전력전송이 이루어지고 있다. 이런 고압을 22.9KV와 같은 전압으로 변압시키기 위해서는 상당히 큰 변압기가 사용되어지며 변압기 내부에서 이상부위(부분방전점)를 찾기 위해서는 변압기의 부분하나 하나를 세밀히 점검해야 한다. 이렇듯 가로, 세로, 높이가 각각 몇 m씩 되는 변압기를 세부적으로 조사한다는 것은 많은 시간과 경비를 필요로 한다.

만일 변압기 내부에서 일어나는 부분방전의 위치를 정확히 찾아낼 수 있다면 수리나 점검할 때 변압기에서 그 부위만을 집중적으로 조사할 수 있으며 상대적으로 부분방전점의 위치를 모를 때에 비하여 시간적으로나 비용면에 있어서 많은 절감효과를 얻을 수 있을 것이다. 부분방전의 특성을 연구하면 이 방법을 찾아낼 수 있는데 부분 방전은 방전시 초음파 신호를 발생하므로 초음파 센서를 이용하여 이때의 초음파 신호를 포착 할 수가 있다는 것이 그것이다.

본 연구에서는 두 개의 초음파 센서를 이용하여 부분방전 신호를 감지하고 이 둘 신호파형을 상호상관법을 이용해서 거리차를 구하는 방법으로 변압기 내부의 부분방전의 위치를 찾아 내는 음향 측정법에 대하여 기초연구 하였다.

이 초음파를 이용한 음향 측정법은 부분방전의 크기를 알 수 없고 강도가 비교적 낮다는 결점은 있지만 운전중인 변압기에서 부분방전 및 그 위치를 검출할 수 있는 장점이 있고 비교적 측정하기 쉬운 장점을 갖고 있기 때문에 상호상관법을 이용 보완하여 개발하면 부분방전 측정에 유용한 진단기법이 되리라 생각하며 예비단계로 실험실에서 위치측정법의 연구, 개발을 통하여 변압기의 사고에 방에 기여하고자 한다.

아울러 이 기술이 실용화 된다면 변압기 내부에서 발생하는 부분방전위치를 찾아냄으로써 변압기 수리시 수리시간의 단축과 수리비용의 절감을 꾀할 수 있을 것이다.

2. 부분 방전의 위치 측정 방법

부분 방전 위치 측정법과 관련된 외국의 연구 사례를 보면 1956년 J.G. Anderson에 의해 부분 방전 특성 및, 위치 측정법에 관한 연구를 시작으로 E. Howells, R.T. Harrord는 기류속에서의 부분 방전의 특성, 음속에 대한 관련 이론의 연구를 수행하였다^{[1][4]}. 부분 방전의 위치를 측정하는 방법에는 전기-초음파 신호 측정법^{[2][5]}과 초음파-초음파 측정법^{[1][6]} 두가지로 나눌 수 있다.

2-1. 전기 - 초음파 측정법

전기신호를 기준으로 초음파 신호가 발생되는 시점까지의 시간차이로 부분방전의 위치를 계산하는 방법^{[2][5]}이다. 여기서 기준이 되는 전기신호는 변압기의 증성점지선에 설치한 Rogowski coil에 도착된 부분방전 발생시의 pulse형태의 전기신호이고 초음파 신호는 변압기 외벽에 부착한 초음파센서로 포착한 신호이다. 전기신호의 속도는 광속과 같으므로 시간차이점이 거의 없고 (1m거리에서 3.3×10^{-12} sec의 시간차) 초음파 신호는 80°C의 절연유에서 1200m/sec이므로^[7] (1m거리에 0.83msec의 시간차) 양 신호간의 시간차이에 그 온도에서의 유체초음파 전달속도를 곱하여 그 거리를 산출해 낼 수 있다. 이 방법은 전계가 변칙인 후 현상이 될 때까지의 시간으로 변계가 된 곳까지의 거리를 알아내는 것과 동일한 원리이다.

그러나 대부분의 변압기의 증성점지선에는 불명형전류가 수십 Ampere에서 고장사고시에는 수 천 Ampere까지 흐르므로 이때에 부분방전에 의한 milli Ampere단위의 고장전류는 너무 작아서 Rogowski coil로 포착하기 쉽지않고 또 이 미소한 신호를 구분하기 어렵기 때문에 기준신호를 결정하기가 쉽지 않다. 이런 이유로 threshold level을 어떻게 설정하는가에 따라 부분방전에 의한 신호가 잡히기도하고 그렇지 않기도 한다. 그렇기 때문에 두 신호의 시간차에는 이로인한 오차가 존재한다.

<그림 1>는 전기-초음파 신호법의 개념을 설명하고 있다.

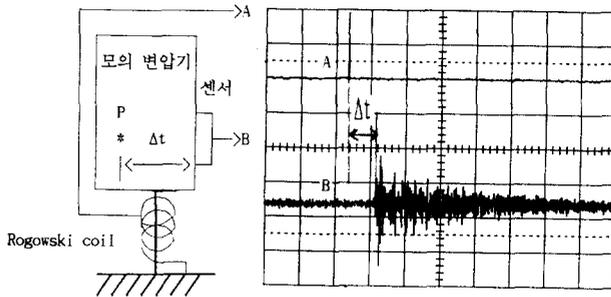


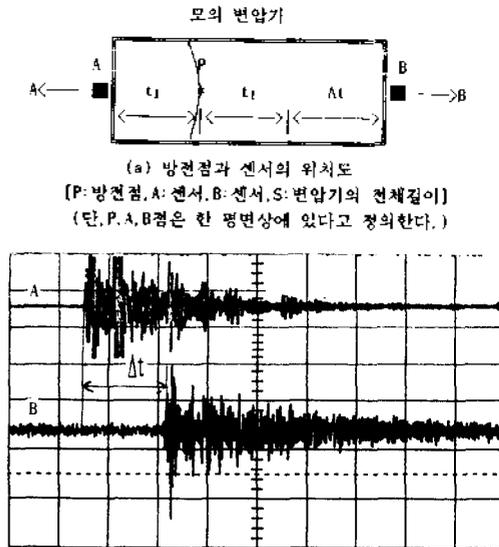
그림 1. 전기-초음파 신호법의 개념도

Fig 1. The method of electric versus ultra signal

<그림 1>에서 위에 보이는 pulse가 Rogowski coil에 포착된 전기 신호이고 아래 보이는 파형이 초음파 센서에 감지된 초음파 신호이다. 부분방전에 발생하면 그 때에 전기신호가 포착되고 Δt 뒤에 센서에 초음파 파형이 잡히게 될 것이다. 방전점 P는 이 Δt만큼의 시간차를 갖는 원 궤도 상에 존재하게 된다.

2-2. 초음파 - 초음파 측정법

이 방법은 기준이 되는 신호가 초음파이고 비교대상신호도 초음파인 방법[11]이다. 이 경우 한 방전에 대하여 변압기외벽의 서로 다른 위치에 부착한 초음파센서로 포착한 두 초음파 신호 상호간의 시간차이로 그 거리를 산출해 내는 방법이다.



(a) 방전점과 센서의 위치도

[P: 방전점, A: 센서, B: 센서, S: 변압기의 전채질] (단, P, A, B점은 한 평면상에 있다고 정의한다.)

(b) 초음파 신호

그림 2. 초음파-초음파 신호에 의한 거리 측정법

Fig 2. Distance measurement method by two ultrasonic signals

<그림 2-a>에서와 같이 P에서 센서 A까지 도달하는 시간 t_1 동안에는 신호가 감지되지 않다가 시간 t_2 후에는 신호가 감지 될 것이다. 신호 A가 감지되기 시작하는 시점에서 신호 B는 센서에 도달하지 않았으므로 신호가 감출되지 않을 것이다. 시간 $(t_1 + \Delta t)$ 후에는 센서 B에서도 신호가 감지되고 이 둘 신호 A, B가 감지되는 시간은 Δt만큼의 차이가 생긴다.

이 Δt만큼의 시간차로 AP와 BP간의 거리 d를 구할 수 있으며 방전점 P는 $BP - AP = d$ 갖는 포물선상에 존재하게 된다.

즉 P가 존재하는 포물선의 궤적은

$$\overline{BP} - \overline{AP} = d \dots \dots \dots (1)$$

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

를 전개 했을때 각각의 x, y좌표가 궤적이 된다.

2-3. 위치 측정에서의 문제점

<그림 3>은 부분방전에 의한 초음파 신호의 시작부분을 확대한 것이다. 이 때 threshold level을 어떻게 설정하는가에 따라 시간오차 Δt는 더욱 커지게 된다. Rogowski coil에 포착되는 전기신호는 거의 완전한 형태의 pulse이나 증성검지선에 흐르는 전류파형에 비해 상대적으로 너무 작아(10⁻⁴에서 10⁻⁶ 까지) 전기신호를 찾아내기가 쉽지않고 초음파신호는 외부신호에 의한 잡음, 전향효과등으로 인하여 부분방전에 의한 신호만을 판정하기가 어렵다. 또한 전기신호와 초음파신호 모두 시간영역에서는 그 시작점을 판정하기 곤란하고 threshold level 설정에 의한 오차를 최소화 하는데 한계가 있다.

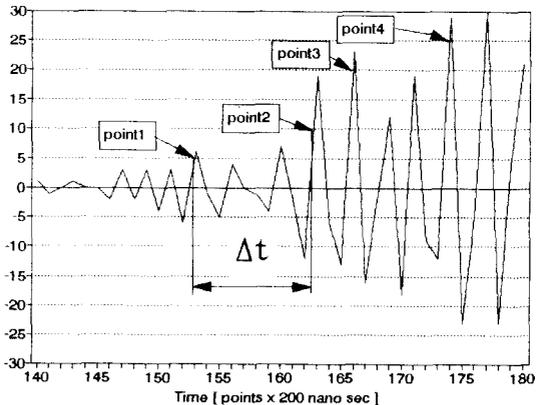


그림 3. threshold level 설정에 따른 오차

Fig 3. Error by institution of threshold level

3. 상호 상관법을 이용한 위치 측정법

3-1. 상호 상관 이론[8][11]

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 방법이 상호상관법이다.

신호파형 x, y가 주파수가 같으면서 시간차(τ=ntk)를 갖는 파형이라면 각각 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$x(t) = e^{-at} \cdot A \sin \omega t + \theta \dots \dots \dots (3)$$

$$y(t) = e^{-at} \cdot A \sin \omega(t - \tau) + \theta \dots \dots \dots (4)$$

위의 수식을 이산신호로 나타내보면

$$x(nT) = e^{-anT} \cdot A \sin nT + \theta_n \dots\dots\dots (5)$$

$$y(nT) = e^{-anT} \cdot A \sin (nT - nkT) + \theta_n \dots\dots\dots (6)$$

이때의 상호상관계수 $R_{xy}(\tau)$ 는

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{k} \left[\sum_{i=0}^k [x(n)y(n-i)] \right] \dots\dots\dots (7)$$

와 같은 식으로 계산된다.

<식 7>에서 $i = nkT$ 가 되면 $x(nT) = y(nT)$ 가 되므로 한 파형의 곱으로 나타낼 수 있고 두 신호는 똑같이 상승, 하강의 파형을 가지므로 각각의 Sampling값들의 곱이 모두 양이 되어 최대의 값을 가진다. 이 최대 값을 가질 때의 k 가 시간차가 된다. 이러한 상호상관(Correlation)의 성질을 이용하여 두 신호사이의 지연시간을 정확히 계산할 수 있으며 이 방법을 상호상관법이라 한다.

따라서 상호상관법은 외란에 의한 측정잡음(일반적으로 모든 주파수 영역에 실리는 백색잡음)의 영향에 덜 민감하며 비교적 정확한 시간차를 찾을 수 있으므로 시간영역에서의 threshold level에 의해 시작점을 찾는 방법보다 정확한 값을 얻을 수 있다.

3-2. 상호상관법의 모의 실험

<그림 4>은 초음파 센서로 감지한 한 부분방전신호를 시간차를 두고 상호상관법을 취했을 때의 상호상관 값을 도시한 것이다. 두 신호간의 시간차는 600point로 하여 실험하였으며 이 때 상호상관을 통해 얻은 차이는 6001 point로 200 [nSec]의 차이를 보였으나 이는 거리상으로 0.24398 mm이므로 무시해도 될 것이다. 이 때 상호상관법에 사용한 파형의 data수는 2000개로 하였다.

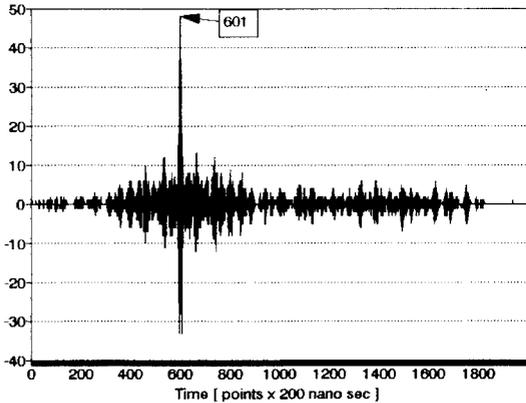


그림 4. 동일파형을 시간차를 두고 상호상관시켰을 때의 파형
Fig 4. The correlation of same signal with time interval

4. 위치 측정 Program과 변압기 실험

4-1. 실험장치

본 실험에서의 실험장치는 모의 변압기, Pre Amp, Filter와 Main Amp, 파형을 저장하기 위한 memory와 memory timing을 맞추기 위한 Timing Circuit, 이를 전반적으로 제어하는 Personal Computer로 구성되어 있다.

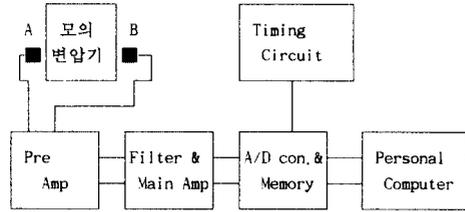


그림 5. 실험장치의 전체적인 구성도
Fig 5. Block Diagram of Experimental Equipment

Memory에 저장되는 파형은 일반 단상교류 전원의 Peak to Peak구간으로 이 구간에서 부분방전이 일어날 확률이 높기 때문이다. 이 부분 동작점을 찾기 위한 장치가 Timing Circuit 부분이다. Memory에 저장된 부분방전의 파형은 일반 Personal Computer로 입력하여 상호상관함수가 계산되고 이를 바탕으로 두 음향신호의 시간차를 구하게 된다.

4-2. 위치 측정 Program

센서에서 감지된 신호는 pre-amp, filter와 amp, memory 장치를 거쳐서 personal computer로 입력된다. 입력된 신호는 digital signal이 되므로 이를 software적으로 처리할 수 있다.

이 정보는 우선 상호상관 처리를 거쳐 상호상관 값이 가장 큰 sampling point를 찾게 된다. 이 point에 sampling time을 곱하면 두 초음파 신호간의 시간차를 구할 수 있게된다. 이 시간차를 바탕으로 거리차를 구할 수 있는데 여기에는 실험당시의 절연유 온도 고려하여 그 때의 초음파의 음속을 곱하여 부분방전점에서 두 센서까지의 각각의 거리사이의 거리차를 얻을 수 있다. 이 거리차의 값과 두 센서의 좌표, 변압기의 크기, 절연유의 온도등을 이용하여 부분방전점의 위치를 찾을 수 있다.

<식 2>를 다시 적어보면

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

앞서 서술한 바와 같이 이 식을 전개하여 x, y좌표를 구하는 것은 계산이 복잡하기 때문에 센서를 원점으로 하는 좌표계로 바꾸면

$$\sqrt{(b_1 - x)^2 + y^2} - \sqrt{x^2 + y^2} = d \dots\dots\dots (8)$$

<식 8>과 같이 수식이 간략하게 되고 이를 전개하여 x, y좌표식으로 구해보면

$$y = \pm \sqrt{ax^2 + bx + (a^2/4)} / d^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{단, } a = (b_1^2 - d^2) \quad b = (b_1 d^2 - b_1^3)$$

<식 9>에 의해 x 값을 변위값으로 하여 그 때의 y값을 구하는 함수이다. 다시 이 값들은 변압기 기준의 좌표계로 변환되어 file로 저장되고 이 file은 다시 graphic과 방전점의 좌표를 계산하는데 사용된다.

4-3. 변압기에서의 위치 측정

㉑ 실험 방법

- 실험방법은 다음과 같은 순서로 진행하였다.
1. 가로 40.8 Cm, 세로 25.5 Cm, 높이 31 Cm 인 모의 변압기내에 초음파 발생기를 넣어 초음파신호를 발생시키고 변압기 외벽에는 두 개의 초음파 센서를 부착시켜 초음파 발생신호를 포착하였다.
 2. 센서의 부착높이를 측정하여 초음파 발생기와 같은 높이에 위치하도록 하여 센서와 초음파 발생기가 한 평면상에 존재하게 하였다.
 3. 초음파 신호가 발생될 때 마다 Trigger 동기신호도 발생시켜 두 개의 32K byte RAM에 그 초음파 신호 파형들을 저장하였다.
 4. RAM에 저장된 파형들을 file 단위로 처리하여 personal computer로 읽어 들었다.
 5. 센서의 부착위치를 바꾸어 가면서 1-4의 과정을 반복하여 각각의 data를 저장하였다.
 6. 저장된 각 Data 값들을 이용하여 부분방전위치 측정 Program을 통해 부분방전점의 위치를 찾았다.
 7. 두 센서의 부착위치를 5회 바꾸가면서 값을 구하였다.

㉒ 실험 결과

반복 시험의 각 data 값은 <표 1>과 같고 궤적을 화면처리한 것은 <그림 6>과 같다.

> 설정한 방전점의 좌표 (10, 15)

> 비교대상이 되었던 좌표위치 A(0, 17.5) B(40, 5, 3)

표 1. 센서의 좌표와 program을 이용해서 구한 방전점 좌표(단위:cm)

센서 A좌표	센서 B좌표	거리차 : I1-I2 [Cm]	계산에 의해 구한 방전점
A(0, 17.5)	B(40, 5, 20.5)	18.67	(11.77, 18.68)
A(0, 7.2)	B(40, 5, 3.5)	24.80	(9.78, 12.98)
A(0, 7.2)	B(40, 5, 23)	26.26	(9.59, 13.64)
A(0, 17.5)	B(40, 5, 23)	26.26	(9.52, 17.19)

이때 이 자료들을 이용하여 부분방전점 P의 좌표값 (mean ± 0, mean ± 0)으로 나타내면 P(10, 168 ± 0.929, 15, 622 ± 2.382)이다.

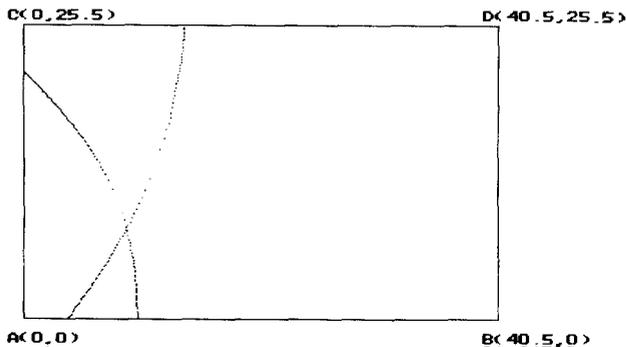


그림 6. 부분방전점의 궤적
Fig. 6. Locus of partial discharge point

5. 결론

이전까지 변압기 내에서 부분방전의 위치를 측정하는 방법으로 전기-초음파 측정법을 사용하였으나 이 방법은 중성점지선으로 흐르는 수 십에서 수 천 Ampere의 전류에서 수 milli Ampere의 전기신호를 찾아내는 방법이 기술적으로 힘들기 때문에 사용상에 문제가 많았다. 이를 해결하기 위한 방법으로 초음파-초음파 측정법이 연구되었으며 부분방전 발생시 발생하는 초음파 신호는 변압기 외벽 어디에서 감지하든 주파수 특성이 동일하다는 점을 이용 상호상관법으로 두 신호의 시간차를 얻어내어 이를 바탕으로 거리차를 구할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 이런 과정을 거쳐 얻은 거리차를 바탕으로 부분방전점을 찾고 화면상으로 보여주기까지의 일련의 과정을 Program화 하여 기존의 수 많은 수작업 과정을 거쳐 구하던 부분방전점의 위치를 전문가가 아니더라도 쉽고 정확하게 찾을 수 있도록 하였다. 앞으로의 과제로 3 차원에서 부분방전점을 찾는 방법이 연구되어 실제 변압기내에서 부분방전의 위치를 찾는 방법이 연구되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

1. S. L. Jones, "The detection of partial discharge in power transformers using computer aided acoustic emission techniques", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada June 3-6, 1990
2. 전력기기 예방진단 기술연구 (최종보고서) 1991. 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. 곽희로외 5명, "Rowgoski Coil과 초음파 센서를 이용한 변압기 내 부분방전 탐지 및 위치검출", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 1990. 7.
6. 곽희로, 김세철, 조국희, "개선된 초음파방법에 의한 변압기내 부분방전 위치 검출", Journal of the Institute of Basic Science and the Industrial Technology Research Institute, Soong Sil University, Vol. 19, 1989.
7. 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.
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 Volume]. Corona measurement and Interpretation, American Society for Testing and Materials 1979.
10. 久保義昭의 4명, "變壓器部分放電自動監視裝置の開発と フィールド試験", 일본전기학회 고전압연구자료(자료번호:HV-82-26)
11. Richard E. Blahut, "Fast algorithms for digital signal processing", Addison-wesley publishing company, 1987.