

## 변압기 절연열화진단 시스템개발에 관한 고찰

(Study on Development of Insulation Degradation Diagnosis System for Electrical Transformer)

김이곤\* · 유권종\* · 김서영\* · 조용섭\*\* · 박봉서\*\* · 최시영\*\* · 심상욱\*\*

(Yigon Kim · Kwen-Jong Yoo · Seo-Young Kim · Yong-Sub Cho · Bong-Seo Bak, Si-Young Choi, Sang-Uk Sim)

(여수대학교\* · 포항제철소\*\*)

### Abstract

Insulation aging diagnosis system provides early warning regarding electrical equipment defect. Early warning is very important in that it can avoid great losses resulting from unexpected shutdown of the production line. Since relations of insulation aging and partial discharge dynamics are non-linear, it is very difficult to provide early warning in an electrical equipment. In this paper, we propose the design method of insulation aging diagnosis system that use a magnetic wave and acoustic signal to diagnoses an electrical equipment. Proposed system measures the partial discharge on-line from DAS(Data Acquisition System) and acquires 2D patterns from analyzing it. For filtering the noise contained in sensor signals we used ICA algorithms. Using this data, design of the neuro-fuzzy model that diagnoses an electrical equipment is investigated. Validity of the new method is asserted by numerical simulation.

### 1. 서론

전기설비의 주기적 정비 방법은 인건비의 상승으로 인하여 경제적이지 못할 뿐만 아니라, 정확한 교체시기를 경험적인 주기로 하고 있어서 복잡한 주변 환경적인 요소나 열화상태를 고려하지 못한다. 일반적으로 불규칙적인 전기 기기의 사고를 미연에 방지하는 것이 어렵기 때문에 전기 기기의 활선 상태에서 상태진단을 할 수 있는 진단시스템의 필요성이 강조되고 있다.

대부분의 고전압 전력설비는 내부에 발생하는 부분방전에 의해 절연물의 열화가 발생하여 사고의 원인이 된다. 그러므로 부분방전의 초기발견, 그 진행상태 및 위치를 찾아서 분석함으로써 절연열화에 의한 고전압 전기설비 사고를 미연에 방지하여 고장으로 인한 파급 효과를 최소화할 수 있다. 부분 방전에 의한 전력용 절연체의 열화 진단방법은 시스템이 받는 스트레스가 없어 기기에 손상을 주지 않고 활선 상태에서 진단이 가능한 가장 효과적인 진단 기술로 평가받고 있는 기술로 꾸준히 연구가 진행되고 있다[1]. 지금까지 개발된 부분방전에 의한 전기설비의 절연열화에 관한 방법을 살펴보면, 로고스키 코일(Rogowski coil)을 중성점 및 접지선에 연결하여 부분방전에 의하여 발생되

는 전류 펄스를 검출하거나, 전자파를 측정하는 방법과 기기 외함에 초음파 탐촉자를 설치하여 초음파(AE)신호를 검출하는 방법, 부분방전에서 발생하는 빛을 영상으로 분석하여 열화과정에서 나타나는 트리의 생성 패턴을 분석하는 방법, 부분방전으로 발생하는 열을 감지하는 방법이 제시되고 있으며, 이들 방법을 적용하여 열화정도를 예측하는 방법이 일부분 실용화되고 있는 실정이다.

이들 방법에서 이용되고 있는 판별 기준인 정량화 신호원에는 전류파, 전자파 및 초음파, 빛, 열 등이 있지만, 복잡한 환경으로부터 발생하는 잡음으로 인해 신뢰성 있는 신호를 얻는 것과 복잡한 열화 메커니즘을 갖고 있기 때문에 열화진행의 단계를 구분하는 기준을 정하는 것이 지금까지의 연구에서 공통된 주된 문제점이다.

본 연구에서 활선 상태에서 대상시스템의 절연열화상태를 판단하여 이상상태를 진단하는 방법을 제안하였다. 부분방전으로 발생하는 절연열화 징후를 이용하여 절연열화의 상태진단 및 절연성 신뢰도를 예측하여 전기기기의 결함이나 이상을 조기에 발견하기 위해서, 부분방전의 진행에 의해 발생하는 초음파와 전자파의 정량적 해석방법을

적용하여 절연열화 진단알고리즘을 구현하였다. 부분방전으로 발생하는 물리적 현상 중에서 활성 상태에서 측정이 가능한 전자파와 초음파를 동시에 측정하는 절연열화진단 시스템을 설계하였으며, 노이즈에 대책으로는 ICA 알고리즘을 적용하여 부분방전으로 발생하는 초음파 신호로부터 노이즈를 제거하고, 예측 모델로서는 뉴로-퍼지 모델을 적용하였다.

## 2. 실험장치 구성

전자파측정 실험장치의 구성은 그림 1과 같이 광대역 Antenna와 초음파센서, 전단 증폭기 그리고 신호분석기(Signal Analyzer) 및 중앙제어 PC 컴퓨터로 구성되었다.

안테나는 수[KHz]에서 500[MHz]까지 측정 할 수 있는 광대역 안테나를 사용하였다. 안테나에서 수신된 미약한 신호는 광대역 Pre-AMP에서 증폭된 후 동축케이블을 통해 Analyzer에 입력된다. 입력된 신호로부터 변압기에서 발생된 전자파를 분석한다. 분석된 데이터는 LAN Cable을 통하여 컴퓨터에 전송되었으며, 컴퓨터에서 특징데이터를 분류하고, 신호분석을 수행 할 수 있도록 구성하였다. 실험방법으로는 방사된 전자파를 측정하기 위해서 Fig. 2-1과 같이 시스템을 구성하여 측정하고자 하는 변압기에서 3m 떨어져 시스템을 설치한 후 변압기에서 발생한 전자파와 초음파를 3개월 동안 측정하였으며, 측정된 데이터를 컴퓨터를 통해 분석 실험하였다.

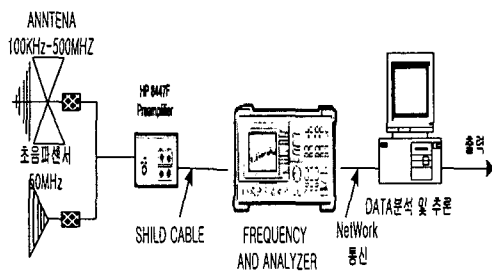


그림 1. 전자파 및 초음파 측정장치  
Fig. 1. Composition of Electromagnetic and Acoustic measurement system

현장에 있는 변압기들의 전자파와 초음파 데이터를 계측하여 계측된 데이터를 기준으로 대역폭별 전자파의 분포상태를 분석, 전자파가 분포된 주파수대역폭 분석, 변압기별 전자파 및 초음파의 분포패턴을 분석하여 진단Data의 정량화하여 적합한 진단시스템의 규격을 설정하는데 기초자료로 이용하였다.

## 3. 실험 및 고찰

### 3.1 신호의 정량화분석

본 연구에서 개발된 절연열화 진단시스템을 이용하여 데이터를 계측 분석 실험한 내용은 다음과 같다. 그림 2와 같이 시간과 데이터 값 및 단위정보를 보여 주고 있다. 본 연구에서는 Sampling Time을 5초, 전자파의 경우는 주파수 대역 10[KHz]-400[MHz]대역에 분포된 전자파 [dB]값의 RMS를 취득하였으며, 초음파의 경우는 [mV]의 단위로 순시 값을 RMS값으로 변환하여 데이터를 취득하였다.

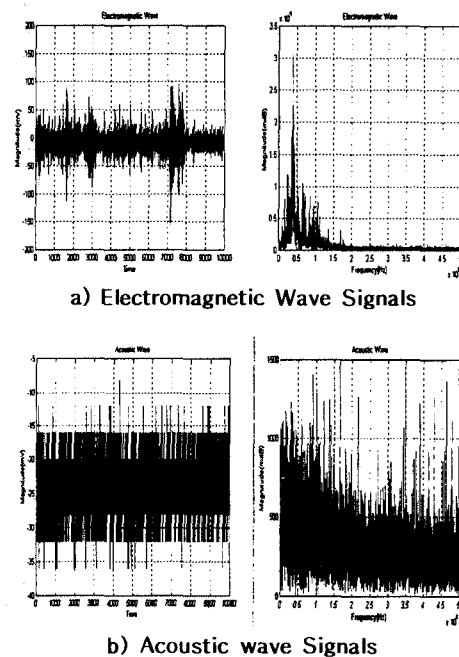


그림 2. 전자파와 초음파신호의 데이터  
Fig. 2. Row Data of Electromagnetic and Acoustic Wave signals

실시간으로 얻어진 데이터의 변화가 심하게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 전자파의 경우는 저역으로 가면서 차츰 줄어드는 경향을 보이고 있지만 대체로 변화가 없음을 확인할 수 있지만 그러나 초음파의 경우는 워낙 변화가 심하여 그의 추이를 판단하기 어려웠다.

초음파의 경우는 기계적인 진동 등의 영향으로 발생하는 것으로 확인이 가능하다. 특히 부하의 변동에 민감하거나 주위의 냉각기의 동작에도 민감하게 나타나리라 사료되어 순시적인 변화보다 추이를 관측하기 위하여 Moving Average 1000초 단위로 수행하였다. 이 경우의 특징은 노이즈에 강

인한 특성을 얻을 수 있다. 그 결과 그림 3과 같이 그 추이를 확연히 판단할 수 있었다. 센서에 따라 전체적인 값의 차이가 있지만 변화의 추이는 상당히 일치하는 경향을 분석할 수 있었다.

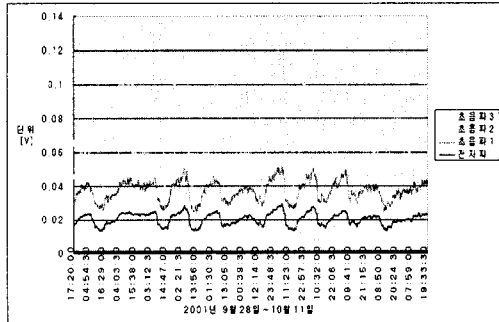


그림 3. 이동평균 후 트렌드  
Fig. 3. Trend after Moving Average

그림 3과 같이 초음파 1을 제외한 2개의 초음파와 전자파의 경향이 일치함을 알 수 있었다. 경향 추이가 심야에서 새벽녘으로 가면서 점차 줄어드는 경향을 보이고 있다. 노이즈를 제거하고, 부분방전 발생과 가장 특성이 같은 신호를 얻기 위하여, 본 연구에서 제안한 ICA 알고리즘을 이용하여 다시 한번 3개 초음파 센서에 대한 신호분석을 실시하였다. 그림 3은 그림 4와 같이 센서 신호를 독립요소분석을 실시하였다.

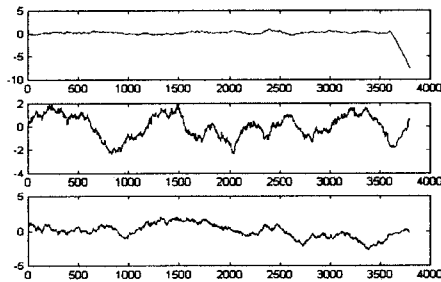


그림 4. ICA 변환 결과  
Fig. 4. Result of ICA transform

분석결과 3개의 신호를 얻을 수 있었으며 대체로 센서의 거리가 충분히 멀리 있는 관계로 신호는 독립된 특성을 갖고 있다. 그러나 2번째 센서의 신호는 6시간 별로 변하는 특징을 갖고 있지만 세 번째의 경우는 완만하게 전자파와 비슷한 경향을 갖고 있다. 첫 번째의 경우는 1번째 센서에서 잡음이 제거된 상태의 완만한 경향을 갖고 있다.

결론적으로 본 실험 결과 전자파와 초음파가 같은 경향을 갖고 있음을 확인하였다. 따라서 변압기에서 발생하는 전자파와 초음파에 상관성이 존재하

고 있음을 보여주고 있다. 이 결과를 통해 확인된 부분방전에 의한 신호발생의 근거를 이용하여 계속적인 데이터 관리를 통해 부하 변동과 데이터, 시간별 데이터의 추이를 계속 관찰하면 변압기의 상태에 대한 정보를 추출하였다. 그림 5, 6은 일주일과 3주간의 데이터 추이를 확인하였다.

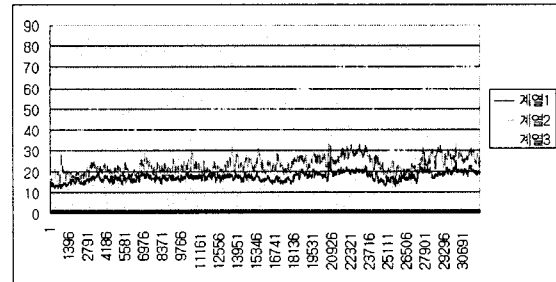


그림 5. 2001년 2월26일 15:13:21부터 2월26일 09:27:58까지의 초음파 신호 트렌드  
Fig. 5. Trend from 22-Feb-2001/15:13:21 to 26-Feb-2001/09:27:58(Acoustic Signal)

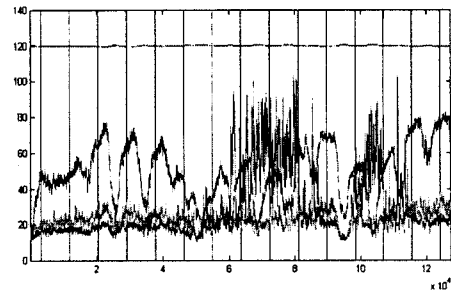


그림 6. 2001년 2월26일 15:13:21부터 3월9일 09:29:18까지의 트렌드  
Fig. 6. Trend from 22-Feb-2001/15:13:21 to 9-Mar-2001/09:29:18

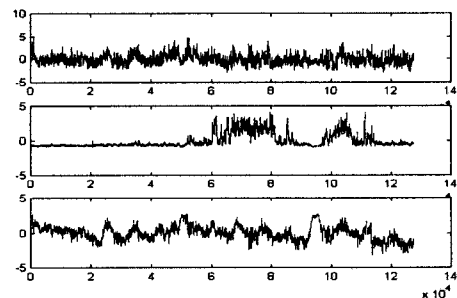


그림 7. ICA 알고리즘을 이용한 신호 해석  
Fig. 7. Analyzed Signal by using ICA Algorithms

그림은 제안된 방법으로 분석하여 얻어진 2001년 2월 14일 오전 11시부터 익일 오전 10시까지의 전자파와 초음파 데이터의 트렌드 변화추이를 보여

주고 있다. 그림 7은 이들 데이터를 ICA알고리즘에 의해서 분석된 데이터를 보여 주고 있다. 이 결과로부터 이상발생에 관련되어 데이터를 2번째 신호에서 그 특성을 완전히 분석하여 보여주고 있다.

지금까지의 트렌드에 의한 분석을 수행한 결과 변압기의 사용조건과 밤낮의 시간주기에 따라서 초음파와 전자파가 특정의 변화 추이를 갖고 있음을 확인 할 수 있다.

따라서 이들 변화에 대한 보상하는 방법이 필요함을 확인하였다. 이 방법은 앞으로 데이터를 장기간 분석함으로써 가능하리라 사료된다.

변화 추이의 경우는 변압기의 운용주기와 같은 변화 추이를 갖고 있으며 변화추이의 패턴은 일간 변화, 주간 변화로 크게 대별되며 월간 변화의 경우는 주간 변화의 반복으로 평가되었다. 그림 6의 경우 3월 2일부터 8일 사이에 센서1로부터 급격한 데이터의 변화가 나타나고 있다.

제안한 ICA 알고리즘에 의하여 이 신호를 분석한 결과 그림 7과 같은 결과를 보여주고 있다. 첫 번째의 경우는 신호 중에서 완만하고 주기적으로 변하는 신호 성분을 보여주고 2번째가 급격하게 변하는 신호의 성분을 보여주고 있다. 이 신호의 독립성이 다른 두 신호성분과는 전혀 다른 특징을 나타내고 있다. 마지막의 신호 성분은 밤낮과 변압기의 동작 조건에 따라 변하는 신호성분임을 알 수 있다. 따라서 두 번째의 신호 변화 주기와 전자파의 주기가 일치하므로 볼 때 변압기에서 발생하는 이상 징후로 판별이 가능하다고 사료되므로 이 기간 중의 변압기의 동작 조건과 비교 검토가 필요하다. 실측된 신호를 2D분석에 기초하여 신호를 정량화하였다. FFT알고리즘에 의해 축차적으로 신호를 분석하여 열화 파형의 2D(빈도수, 방전량) 특징을 추출하였다.

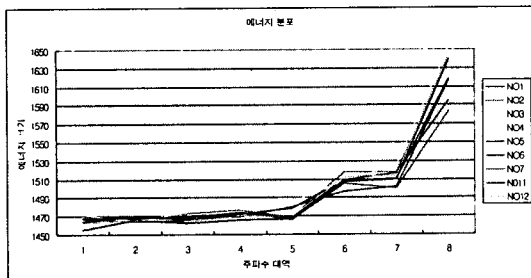


그림 8. 변압기의 2D 데이터  
Fig. 8. 2D Data of transformers

그림 8은 2D분석한 결과이다. 주파수 대역이 높아지면서 전자파의 에너지 밀도가 높아지는 경향

이 빠르게 나타나는 이유는 주변에 분포된 전자파의 측정데이터의 변화가 적으므로 Log값으로 환산하여 측정한 결과 때문이다. 본 연구에서는 그림 8의 2D분석에 의한 경향관리를 중심으로 한 패턴 데이터의 취득을 기본 데이터 관리의 중심으로 하였다.

주파수 대역의 10[MHz]에서 1[GHz]구간을 8개의 구간으로 나누어 각 구간의 전자파 및 초음파의 에너지밀도를 5분간씩의 평균값으로 보여주고 있다. 이들 9개의 변압기 전자파의 방사 패턴이 거의 비슷한 경향을 보이고 있지만 각각에 따라 특징을 포함하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.3 열화진단모델 설계

그림 9는 열화 진단 시스템의 성능구성을 블록 다이어그램으로 나타내었다. 데이터 로거를 입력 인터페이스 장치로 하고 이들 신호를 신호 처리하여 분석한 정량화된 수치데이터와 전문가의 지식을 학습데이터와 입력 데이터로한다. 실시간으로 분석된 데이터는 진단 퍼지 모델의 입력으로하여 대상시스템의 상태를 진단하도록 구성되었다.

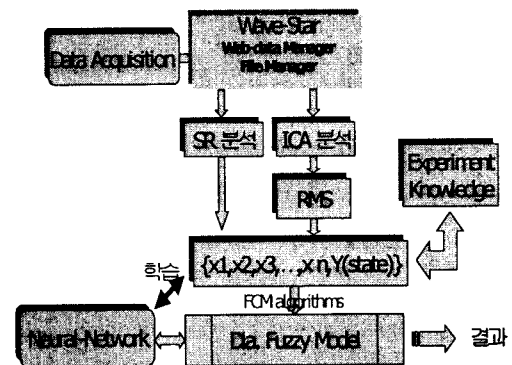


그림 9. 절연열화 진단시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 9. Block-Diagram of Insulation Degradation Diagnosis System

신경망의 경우는 퍼지모델의 파라미터를 학습하는 역할을 하도록 구성하였으며 off-line동작을 수행한다.

그림 10은 열화 진단 시스템의 알고리즘 구성도를 나타내었다. 센서로부터 얻어진 소스데이터를 통신네트워크를 통해 메인 시스템에서 취득한다. 취득된 데이터는 ICA알고리즘을 통해 노이즈를 제거한 다음, 신호처리과정을 통해 특징데이터를 생성한다. 생성된 데이터와 경험을 이용하여 진단 모델을 설계하거나 설계된 모델을 학습데이터를 이용하여 학습할 수도 있으며 학습이 완료된 경우

는 경우 데이터를 입력으로 하여 상태를 진단하도록 구성되었다.

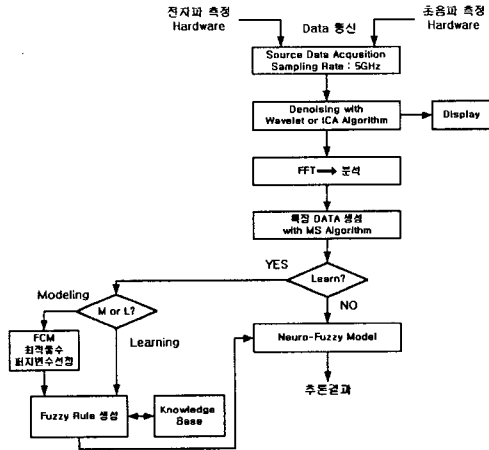


그림 10. 진단 알고리즘 흐름도  
Fig. 10. Flowchart of Diagnosis Algorithms

그림 11은 ANFIS를 이용하여 설계된 모델로 실험으로부터 얻어진 학습데이터를 이용하여 학습이 완료된 진단 모델이다. 이 진단 모델은 두 개의 입력이고, 각 입력변수는 3개의 퍼지변수로 하였으며 9개의 룰로 구성되었다.

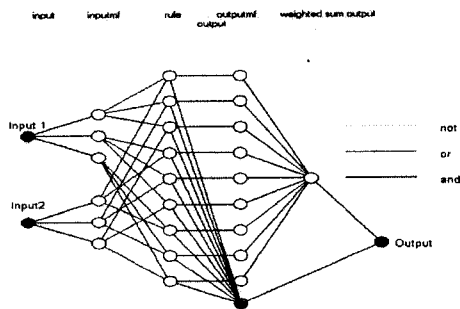


그림 11. 학습된 뉴로-퍼지 모델  
Fig. 11. Learned Neuro-Fuzzy Model

실험에서는 현장의 변압기로부터 전자파, 초음파 데이터를 설계된 실험장치를 이용하여 취득하였으며, 취득된 데이터로부터 대역폭별 전자파 및 초음파의 분포상태와 시간영역에서의 트렌드를 관찰하였다. 그림 3의 관찰 결과로부터 제안된 전자파와 초음파 신호가 서로 상관성이 높음을 확인하였다.

변압기에서 발생하는 전자파의 분포상태를 분석한 결과 10[MHz]-500[MHz]대역에서 발생하는 전자파가 계측 가능한 것으로서 분석되었다. 분석결과와 지금까지 연구 보고된 변압기의 전달 특성을 기초로 30[KHz]-500[MHz]대역을 중심으로 분석

하였으며, 데이터의 정량화를 위한 방법으로는 주파수 분포대역과 전자파의 강도인 방사 에너지의 크기를 변수로 한 2D방법에 의한 진단은 그림 8과 같이 특정 지역의 12대를 중심으로 분석하였다. 분석결과와 시스템관리 및 보수결과와 일치하는 결과를 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안된 부분방전의 2D방법을 전자파측정에 의한 On-Site 진단에 적용이 가능함을 확인하였으며, 대역별 분포 추이를 이용한 정량화가 열화정도판단에 보다 Robust한 결과를 줄 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

고압 고용량의 변압기를 대상으로 한 절연열화 진단시스템설계 방법을 제안하였다. 제안한 초음파와 전자파 측정방법을 조합한 비접촉식방법의 특징은 진단 등으로 인한 시스템의 동작 중에 On-Site진단이 가능하고 측정과정이 간단하며 부분방전계측정보를 상호 보완하여 절연열화에 대한 정보를 제공한다. 신호처리에서는 센서에 포함되어 있는 노이즈를 제거하는 방법으로 ICA알고리즘을 제안하였으며, 열화진단 특징데이터로는 2D분석방법을 제안하였다. 실제 현장의 변압기를 대상으로 데이터를 취득하여 분석하고 각 대상시스템의 상태와 취득, 분석된 데이터의 결과를 비교 검토한 결과 신뢰할 수 있는 결과는 아니지만 가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 과학기술부, 과학재단 지정 지역협력센터인 여주대학교 설비자동화 및 정보시스템 연구개발센터와 포항제철소의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

#### 참고 문헌

- [1] Q. Su, G.H. Vaillancourt, "Computer-Based Multi-Terminal Partial Discharge Measurements of Transformers", Conf. Record of The '96 IEEE Intern. Sym. on Elect. Insul., pp. 61-64, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996
- [2] D.H. Shroff and A.W. Stannett, "A Review of Paper ageing in Power Transformer." IEE Proc. 132 pp. 312-319, 1985
- [3] Bernhard A. Fruth, Detlev W. Gross, "Partial Discharge Signal Conditioning Techniques for On-Line Noise Rejection and Improvement of Calibration."

- Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.397-400, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996.
- [4] T. Hoshino, M. Okubo, "Consideration of Radiation electromagnetic Wave from Partial Discharge Based on Half-Wave Dipole Antenna Model." *T.Jee Japan*, Vol.117-B, No.8, pp.1152-1157, 1997
- [5] Peter M. Eleftherion, "Partial Discharge XXI: Acoustic Emission-Based PD Source Location In Transformers." *IEE Electrical Insulation Magazine* pp. 22-26, 1995
- [6] I.E Lundgaard, "Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 8, September/October 1992. p.34
- [7] H. Muto, M. Doi, H. Fujii, M. Kamei, "Resonance Characteristics and Identification of Models of Electromagnetic Waves Exited by Partial Discharges in GIS", *Trans. of IEE Japan*, Vol.118-B, No. 12, pp. 1408-1414, 1998
- [8] E. Howell, E. T. Norton "Detection of Partial Discharge in Transformers using Acoustic Emission Techniques" *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-97, NO. 5, pp. 1538-1549, 1968.
- [9] P. Osmokrovic, "Mechanism of Electrical Breakdown Left of Paschen Minimum" *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 1 No. 1, pp. 77-81, 1994.
- [10] 임장섭, "신경회로망과 준프랙탈차원을 이용한 전기 절연의 열화진단" 전남대학교 박사학위논문, pp. 24-39 1996.
- [11] M. Muki, T. Okano, S. Nishimoto, L. Kitani, K. Arii, "Study on Degradation Diagnosis of partial Discharge in a Void by Wavelet Analysis." *Ehime University Matsuyama, Ehime*, 790, Japan
- [12] I. Pettersson, N.L. Fantana, U. Sundermann, "Life Assessment of Power Transformer Using Condition Based Evaluation. A New Approach", *CIGRE*, Paper 12-204, 1998
- [13] Mozetic, I., *Model-Based Diagnosis: A Overview*. Page 419-430 of: *Advanced Topics in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag, 1992
- [14] J.S. Pearson, et al, "A Continuous UHF monitor for Gas Insulated Substations." *IEEE Trans. on Elect. Insul.* Vol.26, No.3, pp. 469-478, 1991
- [15] P. F. Wilson and M. T. Ma. "Field radiated by Electrostatic Discharges", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 33, no. 1, pp. 10-18, Feb. 1991.
- [16] K. Nakao, T. Kondo, Y. Suzuoki, T. Mizutani, " $\Psi$ -q-n Patterns and Current shapes of partial Discharges in Void", in *Proc. of '98 int. Sym. on Elect. Insul. Materi.*, in Conjunction with '98 Asian Int. Conf. on Dielec. and Elect. Insul. and the 30th Sym. on Elect. Insul. Materials, Toyohashi, pp. 665-668, Japan, Sep. 27-30, 1998
- [17] Ella Bingham and Aapo Hyvarinen, "A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis of Complex Valued Signal", Aapo. Hyvarinen@hut.fi, <http://www.cis.hut.fi/projects>
- [18] L. De Lathauwer, B. De Moor, and J. Vandewalle, "Independent Component Analysis Based on Higher-order Statistics only." *IEEE SSAP workshop*, Corfu, pp 356-359, 1996
- [19] D. Obradovic and G. Deco, "Unsupervised Learning for Blind Source Separation: An Information Theoretic Approach," in *Proc. ICASSP*, Vol. 1, pp 127-130, 1997
- [20] J. F. Cardoso, "Estimating equations for Source separation," in *Proc. ICASSP'97*, pp 3449-3452, 1997
- [21] A. Bell and T. Sejnowski, "The 'Independent Components' of natural sentences are Edge Filters." *Vision Research*, vol. 37, pp 3327-3338, 1997