

# AE(Acoustic Emission) 센서를 이용한 오차에 강인한 부분방전 위치추정 알고리즘에 관한 연구

(A Study on Algorithm Robust to Error for Estimating Partial Discharge Location Using  
Acoustic Emission Sensors)

조성민\* · 신희상 · 김재철\*\* · 이양진 · 김광화

(Sung-Min Cho · Hee-Sang Shin · Jae-Chul Kim · Yang-Jin Lee · Kwang-Hwa Kim)

## 요 약

본 논문에서는 오차에 강인하게 초음파센서를 이용한 부분방전 위치를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 변압기 내부는 유온이 균일하지 않기 때문에 초음파의 절연유에서 전달 속도를 정확하게 산정하기 힘들다. 그렇기 때문에 처리 과정에서 일정 오차가 발생하게 된다. 따라서 점검자에게 유용한 정보를 제공하기 위해 부분방전의 위치추정 알고리즘은 이런 오차를 충분히 반영하여야 한다. 기존의 위치추정 기법은 좌표로 부분방전 발생 위치를 나타내었지만 본 논문에서 제시하는 LookUp-Table(LUT)를 이용한 기법은 부분방전 발생 위치를 지도형태로 나타내도록 하여 점검자에게 충분히 유용한 정보를 제공할 수 있도록 하였다. 또한 임의로 데이터에 오차를 일으켜 기존 기법과 제시한 기법의 성능을 비교하였다.

## Abstract

This paper presents an algorithm robust to error for estimating partial discharge (PD) location using acoustic emission sensors. In operating transformers, the velocity computing of the acoustic signal is difficult because the temperature of the insulation oil is not homogeneous. So, some error occurs in the process. Therefore, the algorithm estimating PD location must consider this error to provide maintenance person with useful information. The conventional algorithm shows the PD position as a point, while the new algorithm using LookUp-Table(LUT) shows PD position as error-map visually. The error-map is more useful than the conventional result because of robustness to error. Also, we compared performance of them, by adding error to data on purpose.

Key Words : Partial discharge, Neural network, Transformer

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정

\*\* 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-7961

E-mail : dannyone@ssu.ac.kr

접수일자 : 2008년 7월 24일

1차심사 : 2008년 7월 28일

심사완료 : 2008년 8월 12일

## 1. 서 론

전력용 변압기는 전력설비 중 중요성이 매우 높은 설비로 절연 상태 진단을 위해 부분방전을 측정하는

기법이 널리 사용되어 왔다. 변압기 내에서 발생하는 부분방전을 검출할 수 있는 방법으로는 부분방전에 의한 전류 펄스를 검출하는 전기적인 기법, 변압기 절연유에 용해되어 있는 가스를 분석하는 유증가스분석 기법, 변압기 외함에 초음파 센서를 설치하여 초음파 신호를 검출하는 방법 등이 있다[1].

이 방법들 중 전류신호검출법과 유증가스분석법은 부분방전 발생 위치를 추정할 수 없는 단점을 가지고 있다. 반면, 초음파 센서를 이용한 방법은 변압기 내부 점검 시 점검자에게 추정된 부분방전 위치 정보를 제공하여 효과적인 유지보수를 도울 수 있다. 이와 같은 이유로 부분방전의 위치를 추정하기 위해 초음파 센서와 신경회로망을 이용한 기술이 발표되었다[2]. 초음파 센서를 이용한 위치추정방법은 초음파의 특성상 매질의 속성(종류, 온도 등)에 따라 초음파의 전달 속도가 다르기 때문에 오차가 발생할 수 있고 신경회로망의 사용 역시 오차를 발생시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 부분방전 위치 추정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이고 변압기의 점검자에게 실용성 있는 부분방전 위치를 전달하는 기법을 제시한다.

## 2. 기존 부분방전위치 추정 기법

### 2.1 신호처리

기존에 제시된 초음파 센서를 이용한 부분방전의 위치 추정에서는 그림 1과 같은 알고리즘이 적용된다[1-4].

우선 AE 센서에서 측정된 값을 읽어 들인 후 검출된 신호를 식 (1)을 이용하여 1에서 100까지의 수로 정규화 처리를 수행한다.

$$x[n] = \frac{100 \times |u[n]|}{\max |u|}, 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

$u[\cdot]$  : 검출된 초음파 신호  
 $N$  : 전체 신호의 개수

정규화 처리 후 식 (2)의 이동평균을 취하고 부분

방전 개시시간을 설정한다.

$$MV[n] = \frac{1}{M_1 + M_2 + 1} \sum_{k=-M_1}^{M_2} x[n-k] \quad (2)$$

$$M_2 \leq n \leq N - (M_1 + 1)$$

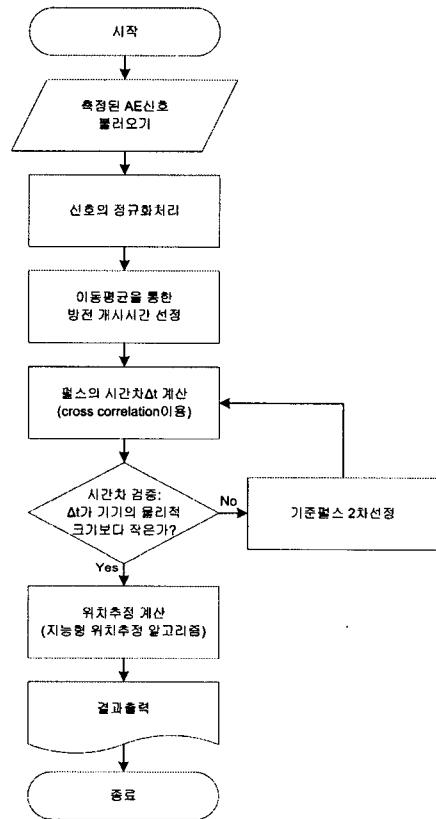


그림 1. 위치추정 알고리즘  
 Fig. 1. Algorithm of estimating PD location

센서간의 부분방전 검출 시간의 차이를 구하기 위해 식 (3)에 표현한 상호상관 기법의 사용한다.

$$R_{xy}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} \bar{x}[n] \bar{y}[n+k], k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

두 개의 센서에 입력되는 두 신호의 시간차는 상호상관법(Cross Correlation)을 이용하여 얻을 수 있으며 상호상관값( $R_{xy}[k]$ )이 가장 클 때의 해당하는 Sampling Number( $k$ )에 Sampling time을 곱한 값이

두 개의 센서에 입력되는 두 신호의 시간차가 된다[3].

그림 2는 3차원 공간에서 3개의 센서를 이용하여 취득한 신호의 처리 과정을 보여 주는 예이다. 첫 번째 행은 취득된 3개의 신호이고, 두 번째 행은 정규화와 이동평균을 취한 파형이고, 세 번째 행은 센서 1과 센서 2, 센서 2와 센서 3, 센서 3과 센서 1을 각각 상호상관을 취한 파형이다.

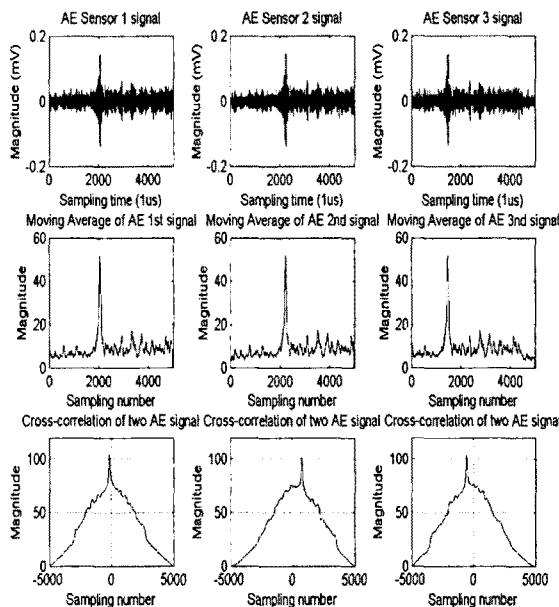


그림 2. 부분방전 위치 추정을 위한 신호처리  
Fig. 2. Signal processing for estimating PD location

식 (1)~(3)의 과정을 통해서 구한 초음파 센서간의 시간차( $T_{d12}$ )에 절연유에서의 초음파 신호의 전파 속도( $\nu$ )를 곱하면 부분방전 발생 위치에서 각각 초음파 센서간의 거리의 차( $D_{d12}$ )를 구할 수 있다. 이것을 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다[1].

$$D_{d12} = T_{d12} \times \nu \quad (4)$$

## 2.2 부분방전 발생위치 계산

부분방전의 발생위치는 그림 3에 나타난 것처럼 각각의 센서 위치를 중심으로 하고 반지름이  $D_{d12}$ 만큼 차이가 나는 원의 교점에 위치하게 된다. 따라서

1차원에서는 최소 센서 1쌍이, 2차원과 3차원에서는 최소 센서 2쌍, 센서 3쌍이 계산에 필요하게 된다.

즉, 3차원 공간에서는 부분방전의 위치를 계산하는 것은 식 (5)에 나타난 것과 같이 3개의 구의 방정식의 교점을 찾는 문제로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} (x-s_{1x})^2 + (x-s_{1y})^2 + (x-s_{1z})^2 &= (r+|d_{31}|)^2 \\ (x-s_{2x})^2 + (x-s_{2y})^2 + (x-s_{2z})^2 &= (r+|d_{23}|)^2 \\ (x-s_{3x})^2 + (x-s_{3y})^2 + (x-s_{3z})^2 &= (r)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

- ※ 센서 3이 가장 먼저 신호가 입력되었을 경우
- $x, y, z$  : 부분방전 위치 좌표
- $S_{ix}, S_{iy}, S_{iz}$  : 센서  $i$ 의 좌표
- $d_{ij}$  : 방전원에서 센서  $i$ 과 센서  $j$ 까지 거리의 차
- $r$  : 방전원에서 센서 3까지의 거리

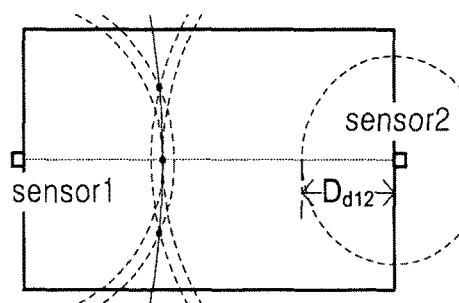


그림 3. 부분방전 위치  
Fig. 3. PD location

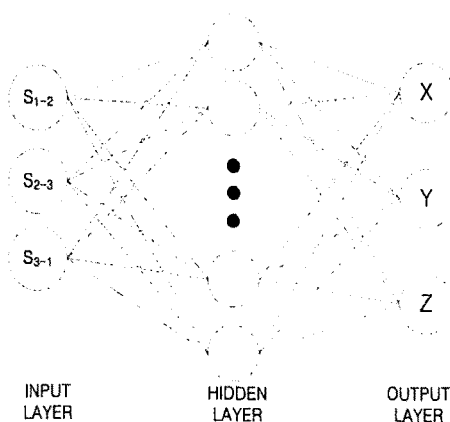


그림 4. 신경회로망의 구조  
Fig. 4. Structure of neural network

식 (5)의 방정식을 이용한 부분방전의 위치 계산은 센서 3개 사용 시 3개의 방정식을 얻게 되지만 4개의 변수(x,y,z,r)가 발생하여 해를 구할 수 없고, 센서의 수를 증가시켜 전형적인 수치해석 기법(Newton-Raphson)을 적용하여도 수렴문제로 해가 구해지지 않는 경우가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 신경회로망을 적용한 기법이 제시되었다. 신경회로망은 식 (4)에서 구해진 거리차를 입력으로 하고 부분방전 위치 좌표를 출력으로 하도록 설계되었으며 그림 4에 나타내었다[2,4].

### 3. 고안된 부분방전위치 추정 기법

#### 3.1 초음파센서 위치에 따른 초음파신호 특성

초음파센서를 변압기 내부에 설치하여 성능 개선 여부를 확인하기 위해 3가지의 실험하였다. 초음파 발생 위치와 센서의 위치는 표 1과 그림 5에 정리하였다.

표 1. 초음파 발생 위치 및 센서 위치  
Table 1. Location of the PD and the sensor

사 례	초음파 발생	센서 위치
I	pd1	sensor1
II	pd1	sensor2
III	pd2	sensor1

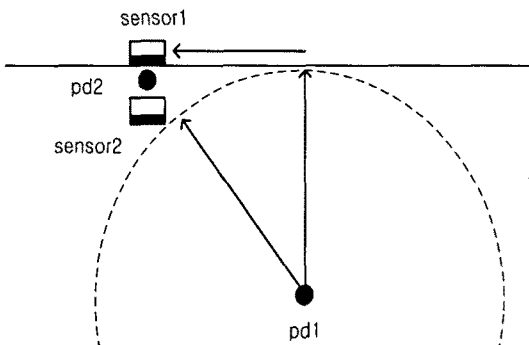


그림 5. 초음파 센서 설치 위치  
Fig. 5. Installment location of AE sensor

초음파 신호가 변압기 외함을 통해 전달되는 것을 방지하고 변압기 외부 노이즈를 차폐하기 위해 내부에 센서를 설치하였다. 하지만 그림 6의 사례 I의 신호와 사례 II의 신호를 비교하면 센서를 변압기 내부에 설치하여도 취득되는 초음파 신호는 개선되지 않음을 알 수 있다. 또한, 사례 III의 경우는 센서의 후면에서 초음파를 발생하여도 0.8[ms]후에 미소하게 신호가 검출되는 것은 변압기 내부에서 외함에 의한 반사파가 센서에 검출된다고 판단할 수 있고 사례 II 신호에서도 초음파가 변압기 외함에 반사되어 센서에 입력되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 초음파 센서를 변압기 내부에 설치하여도 초음파가 변압기 내부에서 외함에 반사되어 센서에 검출되므로 외관의 입력을 개선하지는 못하는 것을 알 수 있다.

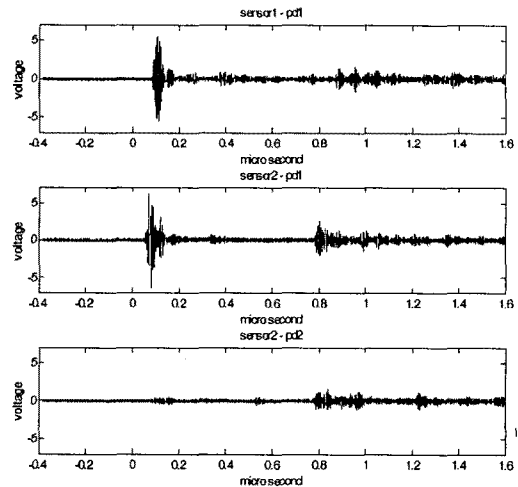


그림 6. 취득된 초음파 신호  
Fig. 6. Detected acoustic signals

#### 3.2 LookUp-Table을 이용한 부분방전 발생 Block 추정

부분방전 위치 추정을 위해 변압기 내부 좌표에서 설치된 각각의 센서까지의 거리차를 사전에 계산하여 LookUp-Table(LUT)을 만들고 오차가 가장 적은 좌표를 부분방전의 위치로 추정하는 기법을 적용하였다. 내부 좌표를 세밀하게 나눌수록 계산량이 방대하게 늘어나기 때문에 그림 7에 나타난 것과 같

이 내부를 일정 크기의 block으로 나누어 오차를 비교 계산하고 오차가 가장 적은 block 내부를 다시 좀더 세밀하게 block으로 나누어 오차가 가장 적은 block을 찾고 이와 같은 방법을 반복하여 LUT에서 오차가 가장 적은 좌표를 찾는 방법을 사용하였다.

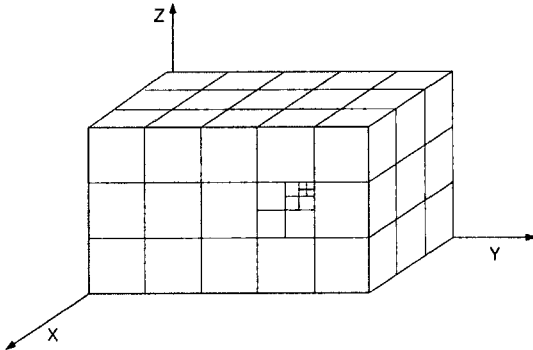


그림 7. 변압기 내부의 block  
Fig. 7. Block inside transformers

최소 오차의 변압기 내부 좌표를 구하게 되면 내부 점검자에게는 부분방전 발생 추정위치를 Error-map으로 나타내도록 하였다.

#### 4. 시뮬레이션

본 논문에서 제시된 LUT을 이용한 부분방전 위치 추정 기법과 신경회로망을 이용한 위치 추정 기법의 성능을 비교하기 위해 그림 8에 나타난 것과 같

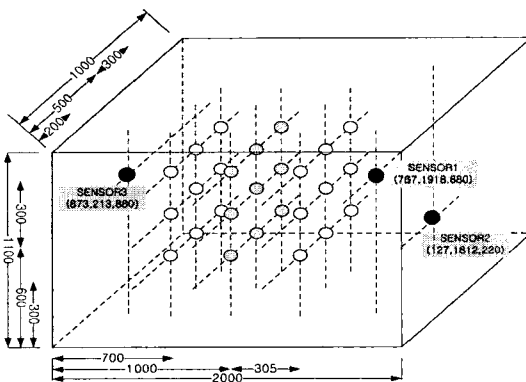


그림 8. 변압기 챔버와 센서의 위치  
Fig. 8. Transformer and the location of sensors

이 모의 챔버에 초음파 센서 3개를 설치하고 부분방전이 그려진 27개의 위치에서 각각 발생 시의 센서간 거리의 차 값을 이용하여 신경망과 LUT을 각각 적용하여 부분방전 위치를 추정하고 추정된 위치와 실제 위치의 오차를 산출하였다. 또한 센서간 거리의 차 값의 산출과정에서 초음파의 전달 속도 등으로 인해 발생할 수 있는 오차를 모의하기 위해 임의로 1[%], 5[%]의 오차를 발생시켜 위치 추정기법에 각각 적용하여 분석하였다.

시뮬레이션에서 적합한 신경회로망의 구조는 그림 4와 같고 세부적인 학습 조건은 표 2에 정리하였다.

표 2. 신경회로망 학습 조건  
Table 2. Training condition of neural network

학습데이터	17,600개		
학습율	0.02	목표오차율	0.001
은닉층 수	10개		
학습함수	Levenberg-Marquardt backpropagation		

표 3. 시뮬레이션 결과(임의 에러 0[%])  
Table 3. Results of simulation(optional error 0[%])

case no.	모의 pd위치			신경망결과			LUT이용 결과		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	200	700	300	155	694	340	200	700	300
2	500	700	300	307	686	483	500	700	300
3	800	700	300	464	695	635	800	700	300
4	200	1000	300	137	1004	348	200	1000	300
5	500	1000	300	300	976	506	500	1000	300
6	800	1000	300	464	979	620	800	1000	300
7	200	1305	300	155	1220	351	200	1305	300
8	500	1305	300	270	1284	506	500	1305	300
9	800	1305	300	461	1268	637	800	1305	300
10	200	700	600	311	712	492	200	700	600
11	500	700	600	470	686	632	500	700	600
12	800	700	600	657	690	748	800	700	600
13	200	1000	600	302	1002	506	200	1000	600

case no.	모의 pd위치			신경망결과			LUT이용 결과		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
14	500	1000	600	464	991	623	500	1000	600
15	800	1000	600	653	997	755	800	1000	600
16	200	1305	600	268	1297	514	200	1305	600
17	500	1305	600	449	1303	652	500	1305	600
18	800	1305	600	629	1290	776	800	1305	600
19	200	700	900	472	742	636	200	700	900
20	500	700	900	651	706	752	500	700	900
21	800	700	900	772	721	883	800	700	900
22	200	1000	900	465	1010	630	200	1000	900
23	500	1000	900	653	1015	760	500	1000	900
24	800	1000	900	825	1014	858	800	1000	900
25	200	1305	900	457	1295	652	200	1305	900
26	500	1305	900	627	1305	785	500	1305	900
27	800	1305	900	776	1286	876	800	1305	900
평균 오차				207.4[mm]			0		

27개의 부분방전 위치에서 3개의 센서까지의 거리의 차를 입력으로 하여 신경회로망과 LUT를 이용하여 부분방전 위치를 추정하였고 그 결과를 표 3에 나타내었다. 센서간 거리의 차 값의 계산에서 오차가 없을 경우에는 신경망의 결과는 평균적으로 207[mm]의 오차가 발생하였고 LUT를 이용한 방법은 오차가 발생하지 않음을 알 수 있다. 센서간 거리의 차 값의 계산에서 각각 오차가 1[%]와 5[%]가 발생한 경우의 결과는 표 4에 정리하였으며 그 결과 오차가 발생하여도 LUT를 이용한 기법이 평균 오차가 적음을 알 수 있다.

표 4. 시뮬레이션 결과(임의 오차 1[%], 5[%])  
Table 4. Results of simulation(optional error 1[%], 5[%])

Case no.	신경망 결과	LUT이용 결과
임의 오차 1[%]	207.4[mm]	171.6[mm]
임의 오차 5[%]	207.6[mm]	200.5[mm]

LUT를 이용한 결과 중 case 1의 경우를 센서간 거리의 차 계산에서 5[%]의 오차를 적용한 결과를 2차원(x-y좌표) Error-map으로 표현하면 그림 9와 같이 나타난다. LUT를 이용하여 추정된 부분방전 위치는 실제 부분방전 위치와 오차를 갖고 있지만 Error-map에서 나타내는 범위 내에 실제 부분방전 위치가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

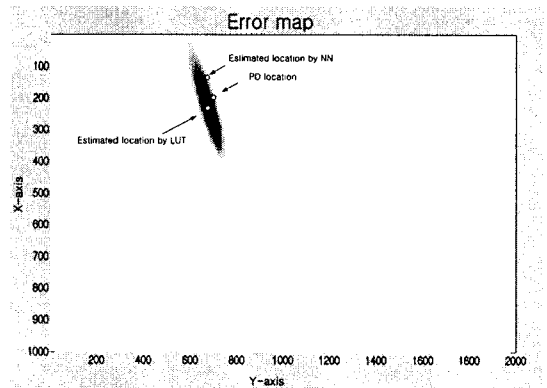


그림 9. 오차 맵(임의 오차 5[%])  
Fig. 9. Error map(optional error 5[%])

### 5. 결 론

본 논문에서는 오차 발생을 고려한 변압기 내부 부분방전 위치추정에 관하여 연구하였다.

AE 센서를 변압기 내부에 설치하는 것은 외함에 의한 신호 감쇠를 방지하지만 변압기 내부에서 반사파의 입력으로 인해 파형이 개선되지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 신경회로망을 이용한 추정기법은 입력 신호의 오차가 없어도 계산과정에서 오차가 발생하여 LUT를 이용한 방법을 제시하였다. 제시한 방법은 입력신호가 오차가 없으면 정확한 위치를 추정할 수 있고 입력 신호의 오차가 있어도 신경회로망을 이용한 방법보다 평균오차가 적은 것을 알 수 있었다.

신경회로망을 이용한 방법은 한 점의 좌표를 결과 값으로 나타내지만 LUT를 이용한 방법은 결과 좌표를 포함하는 Error-map으로 결과를 나타내어 위치 추정과정에서 오차가 발생하여도 충분히 점점자에게 부분방전 발생 위치 정보를 제공할 수 있음을

알 수 있었다.

결론적으로 신호처리과정에서 좀 더 개선된 파형을 취득 기술이 연구되면 변압기의 내부구조와 Error-map의 결과를 잘 활용하여 변압기 내부 점검자에 유용한 진단 기술로 적용될 수 있을 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

**References**

- (1) 문영재 외, "상호상관을 이용한 변압기내의 부분방전 위치측정", 한국 조명전기설비학회 논문집, 제7권, 6호, 1993. 12.
- (2) Yong-Han Yoon, Jae-Chul Kim, Jong-Keun Park, "A Neural Network Approach for On-Line Estimation of Partial Discharge Location in Power Transformer using Advanced Correlation Technique", IEEE ISAP, 1996.
- (3) Vinay K. Ingle, John G. Proakis, "Digital Signal Processing using MATLAB(international Student Edition) -Second Edition", THOMSON.
- (4) 윤용환, "電力用 變壓器의 監視 診斷을 위한 專門家 시스템", 숭실대학교, 박사논문, 1996. 12.
- (5) D. J. Kweon, S. B. Chin, H. R. Kwak, J. C. Kim, K. B. Song "The Analysis of Ultrasonic Singals by Partial Discharge and Noise from the Transtormer", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2005. 07.

◇ 저자소개 ◇

**조성민 (調成旻)**

1980년 10월 3일생. 2003년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2008년 숭실대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정.

**신희상 (申熙尙)**

1980년 9월 18일생. 2007년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학원 석사과정.

**김재철 (金載哲)**

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학부 교수.

**이양진 (李羊鎭)**

1979년 3월 28일생. 2005년 숭실대학교 전기제어시스템공학부 졸업. 2007년 숭실대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 효성중공업 품질검사팀.

**김광화 (金光和)**

1956년 5월 12일생. 1983년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 KERI 전력설비진단 연구그룹 책임연구원.