

# UHF 신호 분석을 통한 모의 GIS 내 부분방전원 추정

(Estimation of Partial Discharge Sources in a Model GIS through the Analysis of UHF Signals)

곽희로 · 노영수 · 전재근\* · 이동준

(Hee-Ro Kwak · Young-Su Roh · Jae-Keun Joun · Dong-Zoon Lee)

## 요 약

본 논문에서는 GIS 내에 존재할 수 있는 부분방전원을 추정하기 위하여 모의 GIS를 제작하고 부분방전의 원천으로 모의된 코로나방전, 연면방전, 파티클의 자유운동, 보이드(void) 방전, 그리고 플로팅(floating) 전극으로부터 발생하는 UHF 신호의 특성을 분석하였다. UHF 신호의 특성 분석의 결과로써 각 부분방전원에 대한 UHF 신호의 주파수 스펙트럼과 위상 특성을 도출하였다. 이 결과를 실제 GIS 내의 부분방전원을 분석하는데 체계적으로 적용하기 위하여 취득된 모든 UHF 신호의 특성을 정량화하고 다층구조를 갖는 역전파학습 신경회로망에 기초한 알고리즘의 데이터로 활용하였다. 구축된 알고리즘의 인식률은 학습과 테스트 데이터에서 각각 약 94[%]와 82[%] 정도로 양호하였다.

## Abstract

This paper describes the analysis of the UHF signal characteristics due to the partial discharge sources which can exist in a GIS. For the experiment, a model GIS was made and 5 types of discharge source were created as follows ; corona discharge, surface discharge, void discharge, discharge due to free particle, discharge from floating electrode.

The frequency spectra and the phase characteristics of UHF signals were induced by UHF signal analysis. The results were quantified to systematically adapt to analyze the PD sources in the GIS and utilized as algorithm data based on the neural network for Back-Propagation Algorithm with a multi-layer structure. The perception rate of the constructed algorithm showed approximately 94[%] and 82[%] in learning and testing data, respectively.

Key Words : UHF signal, partial discharge, GIS, algorithm

## 1. 서 론

GIS(Gas Insulation Substation)는 고압 SF<sub>6</sub> 가스

를 절연매체로 하는 대표적인 전력 기기로써 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않도록 설계되어 있으며 소형화, 고신뢰화, 환경조화 등의 장점을

\* 주저자 : 산일전기주식회사 기술부 사원  
Tel : 02-825-7549, Fax : 02-817-7961  
E-mail : lwajjk@hanmail.net

접수일자 : 2004년 3월 31일  
1차심사 : 2004년 4월 2일, 2차심사 : 2004년 7월 2일  
심사완료 : 2004년 7월 13일

을 가지고 있다[1, 2].

그러나 GIS의 금속가공, 연마작업, 운반, 현장조립, 그리고 가스 주입 시 도체표면의 돌기, 스페이서의 크랙 및 금속이물 등이 발생할 수 있으며, 그 결과 GIS 내에 국부적인 전계 집중현상이 발생하면 부분방전이 일어나서 절연파괴가 발생할 수 있다[3, 5].

절연파괴에 의하여 GIS 내부에 사고가 발생하면 이것은 대형사고로 진전될 가능성이 높고 사고원인의 추정이나 복구 작업이 매우 어렵다. 따라서 GIS의 사고를 예방하기 위하여 부분방전을 검출하고 부분방전의 원인을 진단하는 것이 필요하다. 이 점에 주목하여 본 논문에서는 GIS내 부분방전을 UHF 신호로 검출하여 신호의 주파수 분포와 위상 분포를 분석하여 부분방전원을 추정하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 논문에서는 부분방전원을 추정하기 위하여 실험장치를 그림 1과 같이 구성하였다.

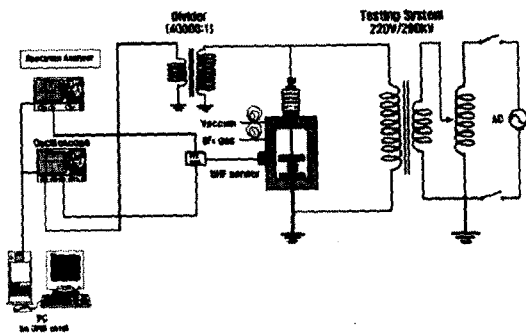


그림 1. 실험장치 개략도

Fig. 1. Schematic of experimental setup

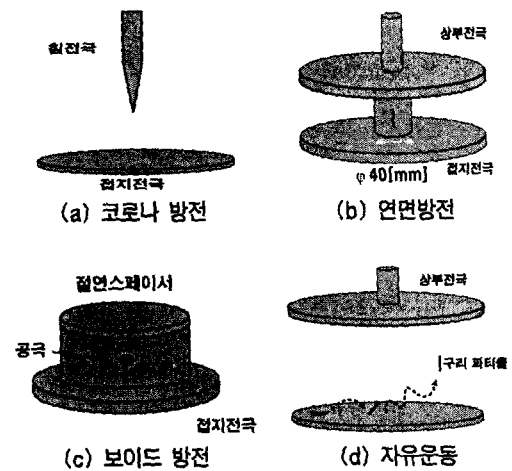
본 논문에서 구성한 실험장치는 그림 1에 도시된 바와 같이 고전압 발생 장치, 모의 챔버(chamber), 그리고 계측분석 장치 등으로 구성된다. 고전압 발생 장치의 주요 부품으로써 시험용 변압기와 고전압 제어기가 사용되고, 모의 챔버에는 모의 GIS 챔버와 GIS 내 부분방전을 모의하기 위한 전극 그리고 진공 펌프와 SF<sub>6</sub> 가스 등이 있다. 계측분석 장치는 전자 파 측정 센서, 신호 분석 장치 그리고 신호처리를 위

한 컴퓨터와 주변기기로 이루어져 있다.

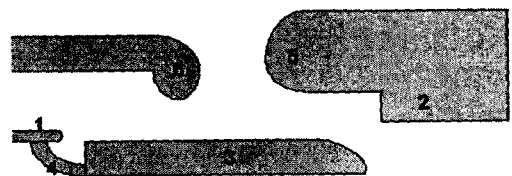
본 논문에서는 검출가능 부분방전 레벨이 5[pC] 이상이고 인가전압의 속도는 약 2[kV/sec]의 속도로 인가하였다. 또한 본 논문에서 사용한 진공펌프는 기름을 이용한 로터리(Rotary) 형식의 진공펌프로  $1 \times 10^{-3}$  [torr]로 균일하게 사용하였다. SF<sub>6</sub> 가스는 모의 GIS 챔버가 진공이 된 후 200[kPa]까지 주입하였다.

제작된 모의 GIS 챔버는 가로, 세로, 높이가 각각 320, 320, 400[mm]이고 최대 400[kPa]의 압력까지 견딜 수 있도록 설계되었다. 모의 GIS 챔버에 금속이물의 거동을 관찰할 수 있도록 관찰창을 설치하고 여기에 UHF 센서를 부착하였다.

모의 챔버에서 고전압과 상부전극이 연결되어 있고 하부전극도 외함파 접지가 되어있다. 사용한



7



1,2: 주출점 3: 노출결함(자형) 4: 결열 5: 차면전극 6: 구리 파티클 7: 검지전극

### (e) 풀로팅 전극

그림 2. GIS의 모의 결함의 개략도  
Fig. 2. Modeled defects in GIS

## UHF 신호 분석을 통한 모의 GIS 내 부분방전원 추정

UHF 센서의 주파수대역은 0.115[GHz]이며 검출된 UHF 신호를 증폭하기 위하여 25[dB]의 이득을 갖는 증폭기를 사용하였다. 증폭된 신호는 자체 내장된 필터를 거쳐 오실로스코프(Tektronics 7804D four channel)와 스펙트럼 어날라이저(HP 8593E)에 전달된다.

### 2.2 실험 방법

GIS의 내부에는 고체 절연물의 공극이나, 고체 돌기, 금속이물, 금속구성품의 접촉 불량 등으로 인한 내부 사고로 분류할 수 있다. 본 논문에서 모의한 부분방전원은 코로나방전, 파티클 자유운동, 연면방전, 보이드 방전, 그리고 플로팅 등의 다섯 가지로 구분하였다. 그래서 본 논문에서 GIS 내부 구성요소에서 발생할 수 있는 부분방전 종류별로 구분하였다. 그림 2는 각각의 부분방전원별로 나타낸 개략적인 모습을 나타내었다. 이 결합들로부터 UHF 센서를 통하여 UHF 신호 검출하는데 목적이 있다. UHF 신호는 부분방전량의 측정범위가 넓고 주파수 대역이 높아서 외부 전자파 잡음과 구분이 확연하여 현재 많이 사용하고 있는 진단법이다. 대표적 주파수 대역은 300[MHz]~3[GHz]대역이다.

## 3. 실험결과

### 3.1 UHF 신호

그림 3은 각 결합에서 발생하는 UHF 신호를 오실로스코프로 측정된 결과를 나타낸다. 임의의 결합에서 발생하는 UHF 신호는 고유한 특성을 갖는다는 가정 하에 본 논문에서는 UHF 신호의 주파수 스펙트럼과 위상 특성을 모든 결합에 대하여 조사하고 그 결과를 비교 분석하였다.

위의 UHF 신호들은 결합의 종류에 대한 일반적인 UHF신호이다. 신호의 패턴이 유사하나 이 신호들로 결합을 종류를 구분하기는 어려움이 있다. 그래서 다음과 같이 분석하였다.

### 3.2 UHF 신호의 주파수 스펙트럼

그림 4는 각 결합에서 발생하는 UHF신호를 스펙트럼 어날라이저를 이용하여 분석한 주파수 스펙트럼

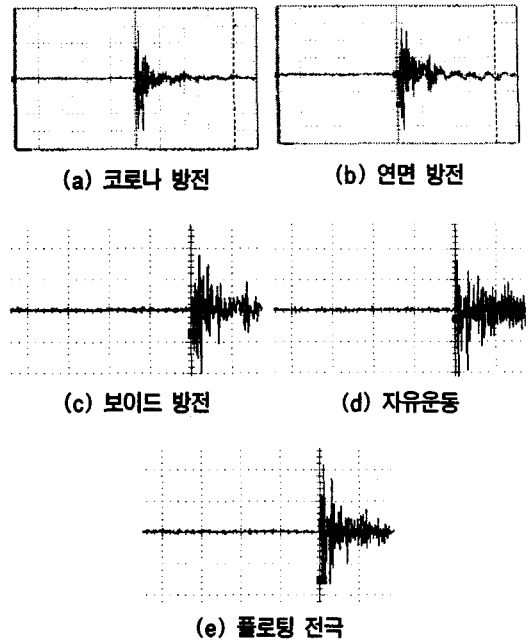


그림 3. 결합에 따른 UHF 신호  
Fig. 3. UHF signals due to defects

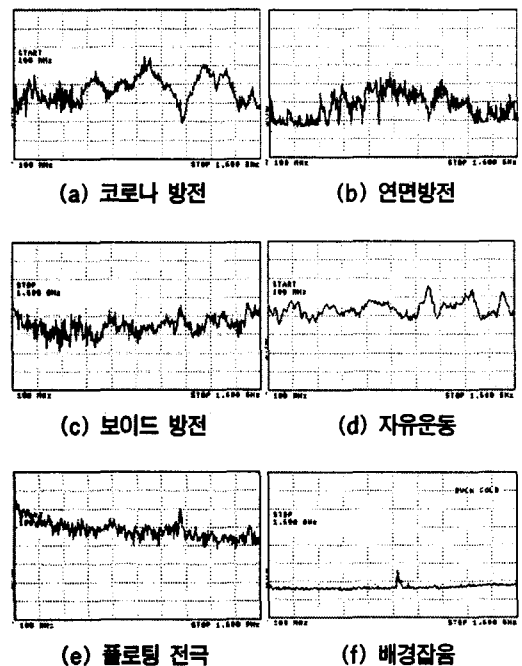


그림 4. 결합별 UHF 신호의 주파수 스펙트럼  
Fig. 4. Frequency spectra of UHF signals by defects

럼을 나타낸다.

그림에서 볼 수 있듯이 각 결합에 의한 UHF 신호의 주파수 스펙트럼은 다른 결합과 구별될 수 있는 특성을 나타낸다. 코로나 방전의 경우, 주파수 스펙트럼은 약 1,000[MHz]에서 최고치, 약 1,150[MHz]에서 최저치 그리고 약 1,300[MHz]에서 다시 최고치를 나타내는 'V' 형태를 보인다. 자유운동의 스펙트럼은 다른 결합과는 다르게 전 대역에 걸쳐 비교적 일정한 세기를 나타낸다. 연면방전의 스펙트럼을 보면 다른 결합과 비교할 때 550[MHz] 이하에서 그 세기가 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

보이드 방전의 스펙트럼은 자유운동과 비슷하게 세기가 전 대역에서 일정하지만 300[MHz] 이하에서 상대적으로 높다. 플로팅 방전의 경우 전반적으로 낮은 주파수대역에서 높은 주파수대역으로 세기가 감소하는 형태를 볼 수 있다. 여기서 각 신호에 대한 배경 잡음의 영향을 조사하였는데 그림 4(f)과 같이 잡음은 850~1,000[MHz]의 주파수 대역에서 관찰되고 그 세기는 상대적으로 미약한 것으로 판명되므로 신호의 주파수 스펙트럼에 대한 잡음의 영향은 무시할 수 있다.

### 3.3 UHF 신호의 특성의 정량화

앞에서 측정된 실험결과를 좀 더 심층적으로 분석하기 위하여 UHF신호의 주파수와 위상 특성을 정량화하였는데 이것은 각 특성의 형태 인식을 통한 결합의 추정에 필수적인 과정이다. 정량화 과정에서 주파수 특성은 100[MHz]에서 1.6[GHz]의 주파수 대역을 125[MHz] 대역으로 나누고 각 대역에서 측정된 데이터의 평균값을 그 대역의 대표값으로 정의하였다. 위상 특성의 정량화에서는 부분방전에 의해 발생한 UHF 신호의 발생률을 위상에 따라 나타내기 위하여 위상을 0°에서부터 360°까지 15° 간격으로 나누고 각각의 대역에서 발생된 UHF 신호의 백분을 횡수로 나타내었다.

이와 같이 정량화된 주파수와 위상 특성의 예를 그림 5와 그림 6에 각각 도시하였다. 그림5에서 보는 것처럼 코로나 방전과 연면 방전은 전체적으로 중간 주파수 대역이 저주파수 대역과 고주파수 대역보다 높은 세기를 나타내고 있다. 그림 5(a)에서 보는 것

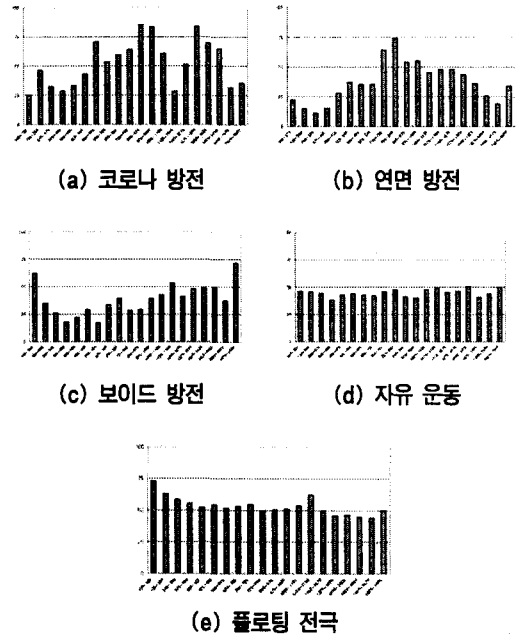


그림 5. 주파수 특성의 정량화  
Fig. 5 Quantization of frequency characteristics

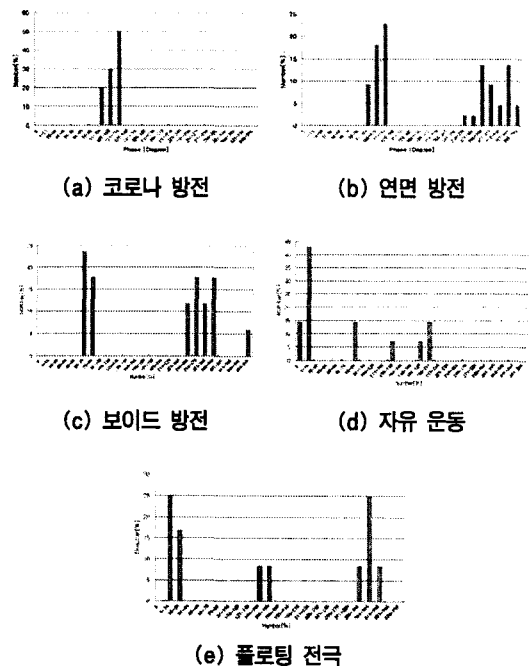


그림 6. 위상특성의 정량화  
Fig. 6. Quantization of phase characteristics

UHF 신호 분석을 통한 모의 GIS 내 부분방전원 추정

처럼 코로나 방전은 875 1.3[GHz] 대역에서 'V' 형태의 스펙트럼을 나타낸다. 이와 달리 연면 방전은 675 1.2[GHz] 대역이 높은 완만한 '∩' 형태를 나타내고 있다. 한편 자유 운동과 플로팅 전극은 전 대역에 걸쳐 비교적 일정한 세기를 보여 준다. 전 대역에서 평평한 '—' 형태의 자유 운동과 비교하면 플로팅의 스펙트럼은 주파수가 높을수록 세기가 감소하는 경향을 나타낸다. 마지막으로 보이드의 경우 중간주파수 대역보다 저주파와 고주파 대역에서 스펙트럼의 세기가 높은 형태를 나타내고 있다.

그림 6에 도시된 위상 특성을 정량화한 예를 설명하면 코로나 방전의 경우 양의 반주기에서 신호가 많이 검출되고, 자유 운동은 특정 위상에 관계없이 산발적으로 신호가 발생하고 있음을 알 수 있으며 규칙성이 없다. 그리고 연면 방전의 신호는 양과 음의 반주기에서 발생하고, 플로팅의 신호는 양의 반주기에서는 90° 이하에서 많이 발생하고 음의 반주기에서는 270° 이상에서 주로 발생하고 있다. 보이드 방전의 경우 신호는 양의 반주기에서는 90°에서 음의 반주기에서는 270° 부근에서 많이 발생하고 있다.

3.4 부분방전원 추정 알고리즘

본 논문에서는 부분 방전원별 UHF 신호의 주파수와 위상 특성을 기반으로 하여 부분 방전의 원인을 추정하는 알고리즘을 구축하기 위하여 다층구조를 갖는 역전파 학습 알고리즘 (Back- Propagation Algorithm)[6]을 이용하였다. 그림 7은 구성된 신경망 알고리즘의 구조를 나타낸 것이다. 이 알고리즘은 하나의 입력층, 두개의 은닉층 그리고 하나의 출력층으로 구성된 전 방향 다층 신경망이다.

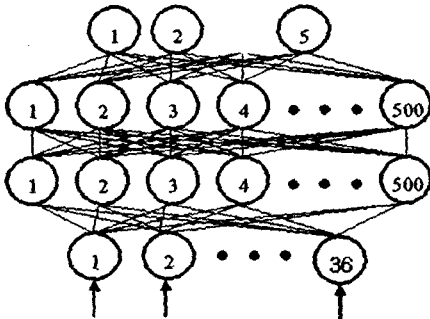


그림 7. 신경망 알고리즘의 구조  
Fig. 7. Structure of neural network algorithm

입력은 정량화된 UHF 신호의 주파수와 위상 특성이다. 알고리즘의 상정은 결함별 UHF 신호가 위상에 따라 발생하는 범주가 다르므로 신호 검출시 발생하는 위상분포에 대한 부분방전 신호를 기준으로 하였다. 만약 코로나 방전의 경우 91151도 부분에서 발생된다. 또한, 본 알고리즘의 중간층은 인식율을 극대화하기 위하여 은닉층을 두개 층으로 하였으며 각각의 뉴런 개수를 500개로 정하였다. 알고리즘의 출력은 코로나, 자유 운동, 연면 방전, 보이드 그리고 플로팅으로 나타나는데 이것을 신경 요소의 학습 신호로 표현하기 위해 코로나, 자유운동, 연면 방전, 보이드, 플로팅을 각각 [+1 -1 -1 -1 -1], [-1 +1 -1 -1 -1], [-1 -1 +1 -1 -1], [-1 -1 -1 +1 -1], [-1 -1 -1 -1 +1]으로 설정하였다.

본 알고리즘의 학습은 입력신호를 순차적으로 입력시키면서 출력층의 출력신호가 허용오차범위에 수렴할 때까지 반복적으로 학습을 진행하고 최종적으로 출력층의 출력신호가 허용오차의 범위내에 수렴하면 신경회로망에 입력패턴이 학습된 것으로 간주하고 학습을 종료하였다. 이 때 사용된 데이터 개수는 총 150개를 이용하였으며 50개를 학습 데이터로 100개를 테스트 데이터로 이용하였다.

알고리즘을 이용하여 수행한 학습과 테스트의 결과를 요약한 표 1에서 볼 수 있듯이 학습된 데이터의 학습정도는 약 94%로 매우 우수하게 나타나 학습이 잘되었음을 알 수 있다. 또한 테스트 데이터를 이용한 인식에서도 약 82%라는 양호한 인식율을 나타내고 있다. 그러나 연면 방전의 경우 65%의 비교적 낮은 인식률이 나타내는데 이것은 연면 방전 데이터의 수렴도가 낮기 때문으로 사료된다.

표 1. 알고리즘의 분석결과  
Table 1. Algorithm analysis results

	코로나 방전	자유 운동	연면 방전	플로팅 전극	보이드 방전	전체
학습	100%	90%	90%	100%	90%	94%
테스트	90%	80%	65%	90%	85%	82%

4. 결 론

UHF 신호분석을 통하여 GIS 내 부분방전원 추정

하기 위하여 많은 부분방전원 중 GIS 내의 대표적인 고장원인으로 알려진 코로나 방전, 자유운동, 연면방전, 보이드 방전, 플로팅방전 등을 단순화하여 모의 하였고 이것들로부터 발생하는 UHF 신호를 측정하여 주파수 및 위상 특성을 분석하였다.

주파수 및 위상 특성을 정량적으로 분석한 결과 각 부분방전원은 고유한 형태의 주파수 스펙트럼과 위상분포를 보여 준다는 것을 알 수 있었다. 부분 방전의 원인을 추정하는 알고리즘을 구축하기 위하여 정량화된 주파수 스펙트럼 및 위상분포의 형태를 기반으로 하여 역전파 학습 신경망 이론을 적용하였다. 이 알고리즘은 학습과 테스트의 인식률이 각각 약 94[%], 82[%]의 우수한 성능을 나타내었다.

### References

- [1] K. Morii, Y. Yamashita, Y. Harumoto, T. Ushio and S. Morioka, "Development of 500kV Gas-Insulated Switchgear and Its Application", IEEE Trans., T 73, pp. 33-38, 1973.
- [2] N. Kiyokuni, K. Matsuura, F. Natsume and Y. Kishida, "Fundamental Techniques for Gas Insulated Apparatus", Fuji Denki Giho, Vol. 56, No. 11, pp. 23-28, 1983.
- [3] L. Ming, Influence of Conducting Particles on the SF<sub>6</sub> Gas Gap Breakdown and Spacer Flashover in GIS, Doctoral Thesis, Chalmers Univ. of Tecnol., Göteborg, 1987.
- [4] H. M. Ryan, D. Milue and C. W. Powell, "Site Testing and Evaluation of a Technique to Diferenciate between a Gas or Spacer Flashover in SF<sub>6</sub> GIS", Working Proceedings of the International Symposium on Gas-Insulated Substations Technology and Practice, Sept. 1985.
- [5] B. Wahlström, W. Lord, K. Petterson and R. Alvinson, "Experiences and Considerations Regarding Erection Testing and Operation Availability of GIS in Sweden", CIGRE, Paris, Paper No. 23-07, 1988.
- [6] K. Jung Joon, J. Yoon Sung, K. Gwang Sub, "Machine Condition Monitoring Using Neural Network", Journal of the Korean Institute of Plant Engineering Vol. 1, Dec., pp. 241-250, 1969.6

이 연구는 전력산업연구개발사업의 일환으로 산업자원부의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 곽희로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1978년 호주 University of New South Wales 고전압공학 대학원 졸업(석사). 1986년 중앙대학원 전력공학 졸업(박사). 1986년 MIT Visiting Scientist. 현재 숭실대학교 공과대학 전기제어시스템공학부 교수 및 숭실대학교 대학원장. 당학회 평의원.

#### 노영수 (盧永洙)

1961년 4월 1일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 미국, University of California, Davis 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기제어시스템 공학부 전임강사.

#### 전재근 (田在根)

1976년 4월 30일생. 2002년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 2004년 동대학원 졸업(석사). 현재 산일전기(주) 기술팀 재직중.

#### 이동준 (李東俊)

1971년 12월 27일생. 1995년 숭실대 전기공학과 졸업(학사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 태광 이엔시 예방진단 팀장.