

뇌방전 위치표정에 관한 연구(I)

(A Study on the Lightning Discharge Positioning)

길경석* · 박대원 · 김일권 · 최수연 · 안창환 · 이영근

(Gyung-Suk Kil · Dae-Won Park · Il-Kwon Kim · Su-Yeon Choi · Chang-Hwan Ahn · Young-Kun Lee)

요 약

뇌경보시스템은 낙뢰에 의한 인적 물적 피해를 예방하는 중요한 장치이다. 본 논문에서는 뇌경보시스템의 주요 기능으로 뇌운의 이동과 활동을 감시할 수 있는 뇌방전 위치표정 알고리즘 및 회로에 대해 연구하였다. 뇌방전시 발생하는 전계성분은 whip 안테나와 공진주파수 300[kHz]의 협대역 공진증폭기로 검출한다. 자계파형 측정회로는 직교루프코일과 적분증폭기로 구성되며 주파수 대역은 5[kHz]~1.2[MHz]이다. 전계파형으로 뇌방전의 극성을 판별하고, 자계파형의 크기와 영점교차점에 의해 방향과 거리를 산출하여 뇌방전의 위치를 표정한다.

Abstract

Lightning warning system plays an important role in protecting human life and other facilities from lightning return strokes. This paper dealt with lightning positioning algorithms and circuits as a main function of lightning warning system, which monitor movements and activities of thunderclouds.

Electric field component produced by lightning discharge is detected by the configuration of a whip antenna and a narrow-band resonance amplifier with center frequency of 300[kHz]. Measurement circuit of magnetic field waveform consists of a crossed-loop coil and an integral amplifier, and its frequency bandwidth is ranges from 5[kHz] to 1.2[MHz]. The polarity of lightning discharge is discriminated by electric field component. After fixing the polarity, we can calculate the direction and distance of lightning discharge by the peak and the zero-cross time of magnetic field waveform.

Key Words : Lightning warning system, Lightning return stroke, Lightning positioning, Thunderclouds, Electric field, Magnetic field

1. 서 론

지상에서 대지전계의 변화를 분석하고 낙뢰위치를 추정하는 기술은 뇌운의 활동과 이동경로, 낙뢰의 발생가능성을 예지할 수 있게 해준다. 이러한 뇌경보시스템은 전력설비의 설계 및 관리, 항공기의 이착륙, 우주선 발사, 운동경기 등 야외활동에서 안

* 주저자 : 한국해양대학교 전기전자공학부 교수
Tel : 051-410-4414, Fax : 051-403-1127

E-mail : kilgs@hhu.ac.kr
접수일자 : 2007년 6월 26일
1차심사 : 2007년 7월 5일
심사완료 : 2007년 7월 25일

전을 확보하는 등 다양한 분야에 능동적으로 활용되고 있다[1-2].

뇌운에 의한 대지전계의 변화는 뇌운의 구조와 활동 특성상 수 백 [ms] 이상 매우 느리게 변화되므로, 이들 전계의 세기는 시정수가 길어 정전계 측정이 가능한 침단 코로나 전극과 필드밀(Electric Field Mill, EFM)과 같은 센서들이 사용되어 왔다[3-5]. 또한 뇌운의 활동이나 이동에 관한 정보는 수 십 [km]~수 백 [km] 떨어진 곳에서 뇌방전시 발생하는 전자파의 특성을 관측하는 것으로부터 분석이 가능하며, 낙뢰의 가능성과 장기 예측의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 중요한 기능이다. 국내에는 공항, 발전소와 같은 중요 시설물과 운동장, 골프장 등의 옥외 활동장소에 뇌경보시스템이 설치되어 있으며, 대부분 대지전계의 세기만을 관측하는 방식이다.

본 논문에서는 뇌경보시스템 개발의 제1단계로 뇌운의 활동과 이동을 관측할 목적으로 뇌방전 위치추정 알고리즘과 회로에 대해 연구하였다. 뇌방전시 발생하는 전자계를 검출할 목적으로 무지향성 안테나와 루프코일로 구성되는 전자계 검출회로를 설계 제작하고, 취득데이터로부터 뇌방전 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였다.

2. 설계 및 제작

낙뢰는 뇌운이 가진 전하를 공기절연파괴를 통해 대지로 방출하는 현상이며, 이 과정에서 전자계가 발생하여 대기중을 전파하게 된다. 낙뢰 위치는 2지점에 설치된 직교 루프코일에 의한 교차점을 구하거나, 3개 이상의 다지점에 설치된 전자계 센서에 도달하는 전자파의 시간차로부터 분석이 가능하다[6-8]. 그러나 실용상 제한된 영역에서의 낙뢰경보시스템에 이들 방식은 부적절하여, 본 연구에서는 협대역 안테나 회로와 직교 루프코일로 낙뢰위치를 추정할 수 있는 시스템을 설계하였다. 그림 1은 낙뢰시 발생하는 전자계 파형을 검출하기 위한 회로로, 직교(E-W, N-S) 루프코일과 중앙에 설치된 전계안테나로 구성되어 있다.

루프코일의 동작원리는 다음의 맥스웰 방정식(Maxwell equation)을 기초로 한다.

$$\int_L E \cdot dL = - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dA = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

여기서 E 는 전계의 세기, B 는 자속 밀도, dL 은 루프의 미소길이, dA 는 미소면적, Φ 는 루프를 통과하는 전자속이다.

루프코일에 입사된 자계중 루프를 관통하는 전자속 쇄교수를 Φ 라고 하면 패러데이의 법칙에 의해 루프 안테나에 유기되는 전압 V 는

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

가 되므로, 낙뢰시 발생하는 자계파형을 검출할 수 있다.

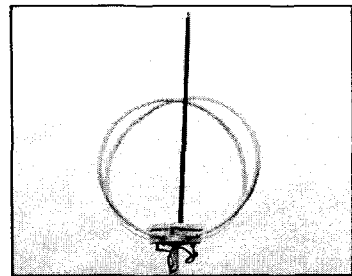


그림 1. 전자계 센서의 사진
Fig. 1. Photograph of the electro magnetic field sensor

또한 낙뢰는 정 또는 부극성으로 발생하는데, 루프코일의 수직 정면으로 정극성 자계가 유도되거나 후면으로 부극성 자계가 유도될 경우에 동일한 극성의 전압이 나타나서 낙뢰의 방향을 정할 수 없기 때문에 낙뢰의 극성을 판별할 필요가 있다.

낙뢰의 극성은 무지향성 whip 안테나와 공조회로에 의해 전계파형을 검출함으로써 분석이 가능하며, 극성을 기준으로 루프센서의 출력과 비교하면 낙뢰의 도래방향을 알 수 있다.

그림 2는 낙뢰의 위치를 추정하기 위해 whip 안테나와 직교 루프코일로 구성된 전자계 파형 검출회로이다.

낙뢰에 의한 전자계 발생시 무지향성 whip 안테나회로의 출력전압에 의해 트리거되고 whip 안테나회로에서는 전계파형의 극성만을 판별하며, 루프코

뇌방전 위치표정에 관한 연구(1)

일은 자계파형의 크기와 폭을 검출한다. whip 안테나 회로의 공진주파수는 낮아져서 전계파형의 주파수를 고려하여 300[kHz]로 설계하였다.

자계파형 검출회로의 주파수 응답특성은 루프코일과 동일한 크기의 교정용 루프코일을 만들고 정현파 전류를 입력시켜 주파수에 따른 자계검출회로의 출력전압으로 평가하였다. -3[dB]의 주파수대역은 그림 3과 같이 5.2[kHz]에서 1.71[MHz]로 낮아져서 발생하는 자계파형을 측정하기에 충분한 특성을 갖는다.

시제작한 회로의 특성은 그림 3의 센서로부터 50[m] 떨어진 위치에 서지발생장치(P SURGE 4010, Haefely)를 설치하고 전자계신호 검출회로의 동작을 조사하였다.

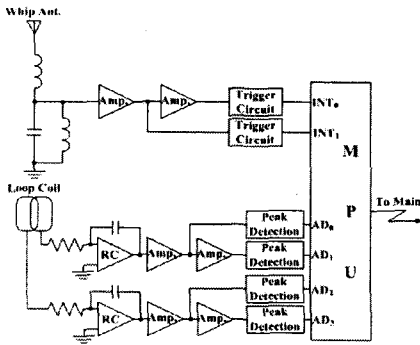


그림 2. 전자계 검출회로
Fig. 2. Electromagnetic field detection circuit

그림 2의 회로에서 전자계 검출회로의 증폭기(Amp)의 1단과 2단의 출력을 각각 인출한 것은 전계 및 자계파형의 정·부극성을 모두 검출하기 위한 것이다.

그림 4에 서지발생장치로부터 8/20[μs], 500[A]를 발생시켰을 때, 전자계신호 검출회로의 출력 예를 나타내었다. 정·부극성 서지전류에 의한 방사자계를 루프코일의 방향(E-W 또는 N-S)에 따라 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이들의 출력은 그림 5와 같이 정부극성 출력값을 peak 검출기로부터 최대값의 크기만 마이크로프로세서의 A/D 입력에 전달된다. 동시에 영점 교차점 시간은 그림 5에서 정 또는 부의 신호값에 대응하는 peak 검출기의 시간간격으로 측정한다.

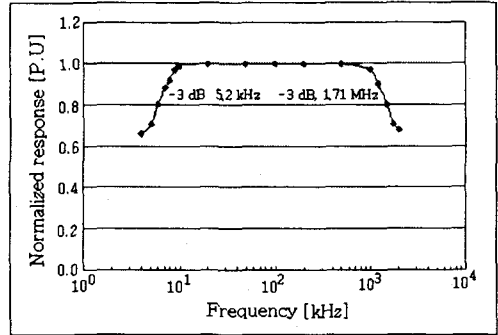
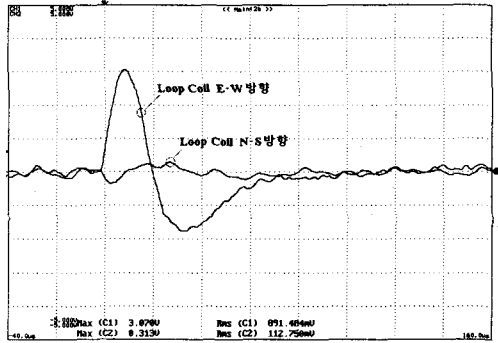
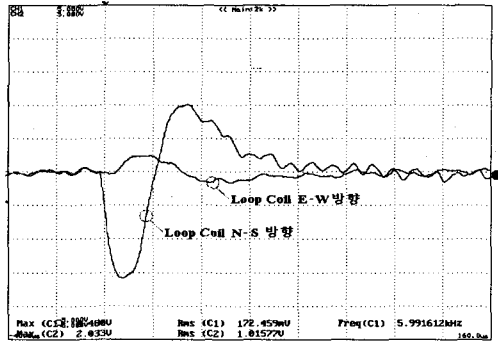


그림 3. 자계 검출회로의 주파수 응답
Fig. 3. Frequency response of the magnetic field detection circuit



(a) E-W 정극성



(b) N-S 부극성

그림 4. 자계 파형의 예
Fig. 4. Example of magnetic field waveforms

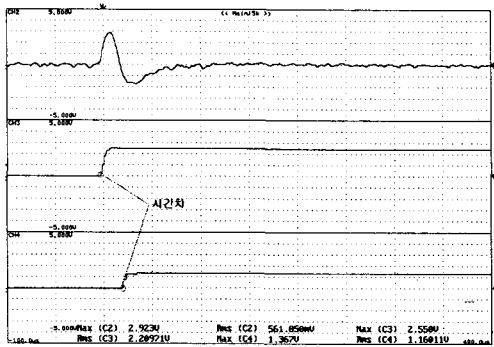
낙뢰의 위치추정은 낙뢰지점과 관측지점간의 거리의 함수로서 전자계 파형이 변화하는 것을 이용하면 가능하다. 전기쌍극자에 의한 지상에서 D만큼 떨어진 지점에서의 시변 전자계의 세기에 대한 시간

적 변화는 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다 [9].

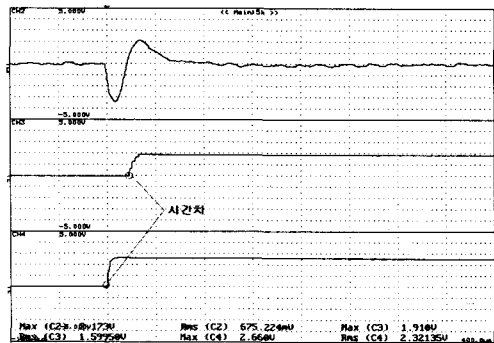
$$E = \frac{[M]}{4\pi\epsilon_0 D^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c D^2} \left[\frac{dM}{dt} \right] + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 D} \left[\frac{d^2 M}{dt^2} \right] \quad (3)$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi D^2} \left[\frac{dM}{dt} \right] + \frac{\mu_0}{4\pi c D} \left[\frac{d^2 M}{dt^2} \right] \quad (4)$$

여기서, c 는 빛의 속도이며, 괄호안의 값은 대기 중의 진전에 의해서 $(t - \frac{D}{c})$ 만큼 지연된 시간에서 얻어진 값으로, $[M] = M(t - \frac{D}{c})$ 으로 나타낼 수 있다.



(a) E-W 정극성



(b) N-S 부극성

그림 5. 자계 파형의 최대값 및 영점시간 측정
Fig. 5. Measurement of the peak and the zero-cross time of magnetic field waveform

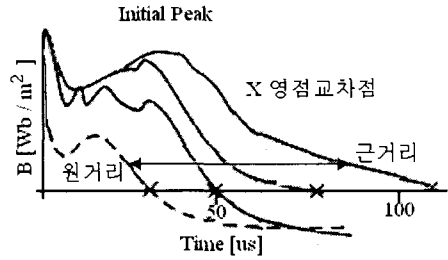
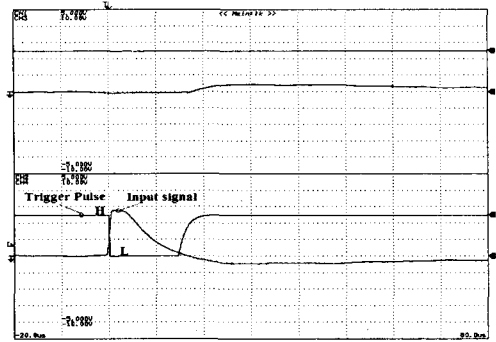
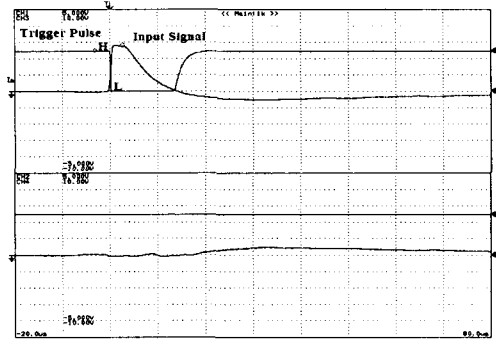


그림 6. 자계 파형의 거리에 따른 변화
Fig. 6. Changes of magnetic field waveform as a function of distance



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 7. 전계에 의한 트리거 예
Fig. 7. Example of trigger by electric field

뇌방전에 의하여 발생하는 전계와 자계 파형의 특성은 상승시간, 피크 후 영점교차까지의 시간, 제 1귀환 뇌격후 반대방향으로의 오버슈트 등의 여러 가지 파라미터에 의하여 특징지어지는데, 이들 파라미터는 식 (3)과 식 (4)에서 표현된 바와 같이 낙뢰지점 또는 운방전 위치로부터 감지용 전자계 검출센서

뇌방전 위치표정에 관한 연구(1)

까지의 거리에 따라 변화된다. 그림 6에 낙뢰에 의한 자계 파형의 거리 의존성을 나타내었다. 낙뢰위치가 관측지점으로부터 멀어질수록 영점교차점이 짧아지는 경향을 나타낸다[9]. 따라서 낙뢰시 전계파형으로 극성을 판별하고, 자계 파형의 영점교차점을 분석하면 낙뢰위치가 관측점으로부터 어느 위치에 있는가를 개략적으로 추정할 수 있다.

그림 7에 같은 위치에서 정·부극성 서지전압을 발생시켜 whip 안테나 회로로부터 검출된 전계신호의 극성에 따른 트리거 회로의 출력 예를 나타낸 것이다.

MPU에서 극성 판별은 그림 2에서 정극성 입력에 대해 INT0, 부극성 입력에 대해서는 INT1이 High ⇒ Low로 변화할 때 검출된다. 방사전계 파형은 극성만을 판별하는 것으로 크기는 측정하지 않는다. 낙뢰위치는 얻어진 파라미터로부터 다음과 같이 추정한다.

(1) “Case Int0 동작시”는 정극성 낙뢰로 트리거된 경우로,

① $AD_0 > AD_1$ & $AD_2 > AD_3$ 이면 자계의 도래방향은 1/4분면 즉, 0~89[°]사이에 위치

② $AD_0 > AD_1$ & $AD_2 < AD_3$ 이면 자계의 도래방향은 2/4분면 즉, 90~179[°]사이에 위치

③ $AD_0 < AD_1$ & $AD_2 < AD_3$ 이면 자계의 도래방향은 3/4분면 즉, 180~269[°]사이에 위치

④ $AD_0 < AD_1$ & $AD_2 > AD_3$ 이면 자계의 도래방향은 4/4분면 즉, 270~359[°]사이에 위치

이와 같이 낙뢰시 자계의 도래방향을 알 수 있으며, 방위각은 상기 ①~④ 조건의 경우에 따라,

$$① \theta_{1/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_0}$$

$$② \theta_{2/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_0}$$

$$③ \theta_{3/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_1}$$

$$④ \theta_{4/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_1}$$

로 산출할 수 있다. 산출된 각 θ 는 수평 X축을 기준으로 표시한다. 이와 낙뢰의 도래방위각을 결정하면, 측정점으로부터 낙뢰점까지의 거리를 그림 5에서 계산된 영점교차점 시간에 반비례하여 계산되며, 영점

교차점 시간의 계산은 ①과 ②의 경우는 AD_0 , ③과 ④의 경우는 AD_1 을 적용한다.

(2) “Case Int1 동작시”는 부극성 낙뢰로 트리거된 경우로, “Case Int0 동작시”와는 $AD_0 \sim AD_3$ 의 부호가 반대가 된다. 각각의 경우에 대해 방위각은 상기 ①~④ 조건에 따라,

$$① \theta_{1/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_1}$$

$$② \theta_{2/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_1}$$

$$③ \theta_{3/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_0}$$

$$④ \theta_{4/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_0}$$

로 산출된다. 마찬가지로 각 θ 는 수평 X축을 기준으로 한다. 영점교차점 시간은 ①과 ②의 경우 AD_1 , ③과 ④의 경우 AD_0 을 적용한다.

그림 8은 전자계 검출회로에 의해 측정·분석된 정보를 그래픽 액정디스플레이에 나타낸 예이다. 화면 좌측상단에는 계산된 위치정보의 확인을 위해 사분면, 방위각, 영점교차시간을 출력하고 동시에 위치를 표정한다. 이들의 자료로부터 뇌운과 낙뢰의 활동상황을 추정할 수 있을 것이다.

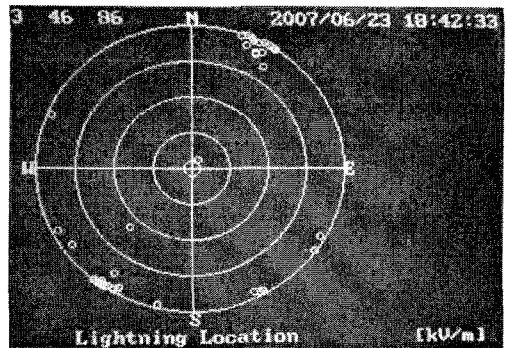


그림 8. 뇌방전 위치표정의 예
Fig. 8. Example of lightning discharge positioning

3. 결 론

본 논문에서는 낙뢰에 의한 피해를 최소화하기 위

한 대책으로 뇌경보시스템을 개발하고자 뇌운의 이동과 활동을 예측할 수 있는 알고리즘과 회로에 대해 연구하였다. 뇌방전시 발생하는 전계성분은 무지향성 안테나와 협대역 공진증폭회로, 자계성분은 직교된 루프 코일과 적분증폭회로에 의해 검출하였다.

전계파형으로부터 뇌방전의 극성을 판별하고 자계파형의 최대값과 영점교차점으로 뇌방전의 방향과 위치를 추정한다.

현재까지는 뇌경보에 필요한 정보를 측정할 수 있는 전자계 측정센서 및 회로, 위치표정 알고리즘에 대해 연구하였으며, 향후 장기간의 실증실험을 통해 고신뢰성 뇌경보시스템을 완성할 예정이다.

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업(R-2006-1-206)의 지원으로 수행되었음.

References

- [1] Takeshi Morimoto, "Thunderstorm Observation by the Operational VHF broadband Digital Interferometer", Osaka University, 2005.
- [2] Zen-Ichiro Kawasaki, "Dependency of VHF broadband Lightning source mapping on Fourier Spectra", Geophysical Research Letters, Vol.27, No.18, pp.2917~2920, 2000.
- [3] J. N. Chubb, "Two New Designs of Field mill type Field meter not Requiring Earthing of Rotating Chopper", IEEE Trans. Ins. Appl., Vol.26, No.6, pp.1178~1181, 1990.
- [4] J. N. Chubb, "The Calibration of Electrostatic Field meters and the Interpretation of their Observations", Electrostatics '87, Inst. Phys. Conf. Series, No.85, pp.261~266, 1987.
- [5] 길경석, 송재용, 김일권, 권장우, 안창환, 이영근, "대지 전계측정을 위한 필드밀의 설계 및 제작", 한국조명전기설비학회지, 제 21권 1호 pp.52~59, 2007.
- [6] Gerhard Diendorfer, Wolfgang Schultz, and V. A. Rakov, "Lightning Characteristics Based on Data from the Austrian Lightning Locating System", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol.40, No.4, 1998.
- [7] E. P. Krider, R. C. Noggle, and M. A. Uman, "Integrated wideband magnetic direction finder for lightning return stroke", J. Appl. Meteorol., Vol.15, pp.301~306, 1976.
- [8] 우정욱, 곽주식, 문재덕, 河崎善一郎, "낙뢰의 3차원 관측 위한 TOA방식 낙뢰감지기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 55C권 11호, pp.527~531, 2006.
- [9] Martin A. Uman, "Lightning", Dover Publications Inc., pp.262, 1982.

◆ 저자소개 ◆

길경석 (吉曠碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 3월~2004년 2월 영국 카디프대학 방문교수. 1996년~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수.
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

박대원 (朴大元)

1977년 12월 28일생. 2003년 한국해양대학교 전기시스템과 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학부 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 박사과정.
E-mail : dwpark77@hhu.ac.kr

김일권 (金一權)

1974년 1월 24일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.
E-mail : kkony@bada.hhu.ac.kr

최수연 (崔瑠淵)

1983년 10월 24일생. 2007년 한국해양대학교 전기전자공학부 졸업. 2007년~현재 동 대학원 석사과정.
E-mail : chl0919@bada.hhu.ac.kr

안창환 (安昌煥)

1959년 11월 4일생. 1983년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1991년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인하공업전문대학 디지털전자정보과 교수.
E-mail : aza@inhatc.ac.kr

이영근 (李永根)

1954년 3월 14일생. 1976년 인하대학교 조선공학과 졸업. 1983년 대한조선공사 Project PM. 1990년~현재 한국이엠아이테크놀로지(주) 대표이사. 2005년~현재 기술표준원 IEC/TC81 피로전전문위원.
E-mail : ykl@emitech.co.kr