

논문 2000-9-2-05

휴대용 극저주파 전장측정기 개발

길경석, 송재용, 김일권

Development of a Portable ELF Electric Field Meter

Gyung-Suk Kil, Jae-Yong Song, Il-Kwon Kim

요약

본 논문은 평판형 센서, 아날로그 증폭기, 이득 조정 가능한 A/D 변환기 및 표시장치로 구성되는 휴대용 전장 측정기에 대하여 기술하였다. 극저주파 대역의 시변전장 검출을 위한 센서의 원리를 설명하고, 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계의 교정장치를 제안하였다.

교정실험 결과로부터 전장측정기의 주파수 대역과 감도는 각각 17 [Hz]~7 [kHz], 4.45 [mV/V/m]이었다. 또한 측정 가능한 최대 전장의 세기는 10 [kV/m]이며, 측정 결과는 액정화면에 숫자로 표시된다.

본 전장측정기는 전력선, 컴퓨터 및 헤어드라이거나 히터와 같은 가전기기 등에서 방사되는 전장의 세기 측정에 광범위하게 적용될 것이다.

Abstract

This paper dealt with the developed portable electric field meter which consisted of planar-type sensor, analog amplifier with gain controller, A/D convertor, and display unit. The principle of the planar-type sensor for detecting time-varying electric field of extremely low frequency (ELF) bandwidth was described, and a calibration system using cylindrical guard electrodes and parallel-plate electrodes was proposed.

From the calibration experiment, the frequency bandwidth and the sensitivity of the developed electric field meter was 17 [Hz] ~ 7 [kHz], and 4.45 [mV/V/m], respectively. Also it can measure the electric field strength up to 10 [kV/m], and the measured result was displayed on the liquid crystal display in digit.

The electric field meter can be widely applied to measure electric field strength radiated from power lines, computers, and home appliances such as hair dryer, heater, etc..

1. 서 론

컴퓨터 및 정보통신기술의 발달과 산업구조의 고도로 전력수요가 급증함에 따라 전력계통의 고안정도, 송전효율의 극대화를 위한 전력설비의 대용량화와 초고압화가 진행되고 있다. 이러한 배경으로 가전기기 및

전력설비 주변에서 발생하는 전자파로 인한 인체의 유해성 논란이 증가되고 있어 전자파에 대한 영향의 평가와 대책수립에 관심이 높아지고 있다^{[1][2]}.

전자파 장애에 대한 대책을 수립하기 위해서는 전자파의 발생원인과 크기 등에 대한 현상을 정확히 파악하는 것은 대단히 중요하다. 외국의 경우에는 이미 1960년대부터 활발한 연구가 진행되어 연구 성과로 축적된 자료도 상당한 수준에 이르고 있으며^{[3][4]}, 각종의

한국해양대학교 전기공학과 (Dept. of Electrical Eng., University)

<접수일자 : 1999년 12월 4일>

계측 기기가 개발되어 상용화되고 있으나, 국내의 경우 1980년대 후반에 관심이 고조되어 아직 미흡한 실정이며 전자파 측정용 계측기도 거의 없는 실정이다.

전자파는 주파수 대역에 따라 극저주파(ELF : 3[Hz] ~ 3[kHz]), 초저주파(VLF : 3 ~ 300 [kHz]), 라디오파(RF : 300 [kHz] ~ 300 [MHz]), 마이크로파(MW : 300 [MHz] ~ 300 [GHz]) 등으로 구분되며, 이 중에서 송·배전선과 같은 전력설비나 일상의 가전 제품군에서 발생하는 전자파는 대부분이 극저주파 대역에 해당한다. 따라서 본 연구에서는 ELF 영역의 전장에 대한 효과적인 측정을 위하여 용량성 평판형 전장센서의 동작원리를 이론적으로 해석하고, 교정방법에 대한 연구를 수행하여 휴대용 ELF 전장측정기를 개발하였다.

본 연구의 휴대용 ELF 전장측정기는 전력설비 및 가전기기 등에서 방사되는 시변전장을 감쇠나 왜곡 없이 측정하기 위하여 -3 [dB]의 주파수 대역을 17 [Hz] ~ 7 [kHz]의 범위로 설계함으로써, 60 [Hz] 상용주파수의 전장은 물론 2 [kHz]까지 전장의 세기를 정확히 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 전장측정기의 측정감도는 4.45 [mV/V/m]로 최소 5 [V/m]에서 최대 10 [kV/m]까지의 전장을 측정할 수 있다.

2. 이론

시변전장의 검출을 위하여 본 연구에서 적용한 평판형 용량성 전장센서의 동작원리는 미지의 시변전장의 세기를 전압으로 변환하여 검출하는 것이므로, 전자계에 대한 맥스웰 전자 방정식 중의 하나인

$$\nabla \times \mathbf{H}(t) = \mathbf{J}(t) + \frac{\partial \mathbf{D}(t)}{\partial t} \quad (1)$$

를 기초로 하며, 여기서 $\mathbf{H}(t)$ 는 자계의 세기, $\mathbf{J}(t)$ 는 전류밀도, $\mathbf{D}(t)$ 는 전속밀도이다.

평판형 용량성 전장센서의 원리도와 등가회로를 그림 1에 나타내었다^[5]. 식(1)에 스토크스의 정리(Stokes' theorem)를 적용하여 적분형으로 표현하면

$$\int_l \mathbf{H}(t) \cdot d\mathbf{L} = \int_s \mathbf{J}(t) \cdot d\mathbf{s} + \int_s \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (2)$$

가 된다.

센서의 양전극사이에 놓인 유전체에 의하여 형성되는 전장의 정전용량을 C_M 이라고 할 때, 미지의 측정

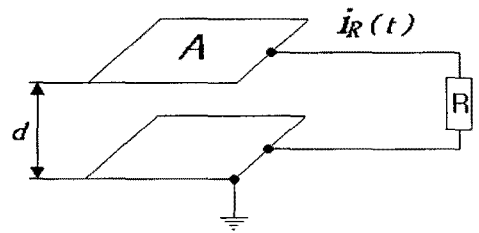
하고자 하는 전압 V_M 이 인가되었다면 이 때에 흐르는 전류 I_M 은

$$I_M = C_M \frac{dV_M(t)}{dt} \quad (3)$$

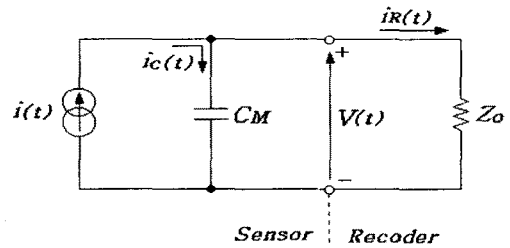
이므로 미지의 전압 $V_M(t)$ 는

$$V_M(t) = \frac{1}{C_M} \int_t I_M(t) dt \quad (4)$$

로 표현된다.



(a) 원리도



(b) 등가회로

그림 1 평판형 용량성 전장센서의 원리도와 등가회로
Fig. 1 Principle diagram and electrical equivalent circuit of a planar-type capacitive electric field sensor

그림 1(a)에서 전극사이를 이동하는 하전입자가 없다고 가정하면 $I_M(t)$ 의 산출로부터

$$V_M(t) = \frac{1}{C_M} \{ C(t)dV + V(t)dC \} \quad (5)$$

로 나타내어진다.

식(5)에서 $C(t)$ 는 전장센서와 측정계 사이의 정전용량이며, dC 는 방전과정을 통한 이의 변화량이다.

또한 $V(t)$ 는 측정계에 인가되는 전압이며, dV 는 이의 변화량이다.

그림 1로부터 전전류 $i(t)$ 는

$$i(t) = i_C(t) + i_R(t) \quad (6)$$

로 표시되므로

$$\epsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot S = C_M \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{Z_o} \quad (7)$$

의 관계가 성립하며, 증폭기의 입력임피던스를 크게 하면 식 (7)에서 첫 번째 항이 두 번째 항에 비하여 대단히 크게 되므로

$$\epsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot S = C_M \frac{dV(t)}{dt} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 미지의 전압은

$$V(t) = d \cdot E(t) \quad (9)$$

로 되어 입사전장의 세기에 직접 비례하게 된다. 즉, 전장센서의 감지량은 전극간격 d 에 의하여 결정된다. 이러한 이유에서 식 (9)로 표현되는 감지량을 얻어내는 센서를 E-센서라고 한다.^[6]

3. 전장측정기의 설계 및 제작

자유공간에서 존재하는 전장의 수직성분을 산란 없이 측정하는 데에는 평판형 전장센서가 가장 감도가 좋으며, 정확하게 감지할 수 있으므로 본 연구에서는 감지면이 대지면에 평행 또는 측정대상의 전장방향에 수직으로 놓일 수 있는 평판형 전장센서와 이를 이용한 전장측정기를 제작하였다. 그림 2에는 이의 개략도를 나타내었다.

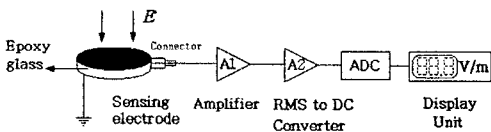


그림 2 전장측정기의 개략도

Fig. 2 Schematic diagram of the electric field meter

전장측정기의 출력전압 $V[V]$ 와 입사전장의 세기 $E [V/m]$ 사이의 관계는 센서의 감지전극과 대지사이의 정전용량을 $C[F]$, 센서의 유효 감지면적을 $A [m^2]$, 증폭기의 입력 임피던스를 $R_i [\Omega]$, 증폭도를 M 이라고 하면

$$V = \epsilon AM \frac{j\omega R_i}{1 + j\omega CR_i} [V] \quad (10)$$

로 되며, $f \gg 1/2\pi CR_i$ 인 주파수 영역에 대한 출력 전압은

$$V = \frac{\epsilon AM}{C} E [V] \quad (11)$$

로 표현된다.

센서의 구성재료로는 PCB 제작용 에폭시 기판을 사용하였으며, 두께가 1.6 [mm], 비유전율 3.5이고, 동박막의 두께가 0.034 [mm]이며 센서의 감지전극의 반경은 82 [mm]이므로 센서의 정전용량은 약 400 [pF]이 된다.

미소 전장신호의 증폭에는 주파수 대역이 DC ~ 1 [MHz]인 TL061 연산증폭기를 사용하였다. 그림 3과 그림 4에는 본 측정기의 증폭회로와 시제작한 전장측정기의 사진을 나타내었다.

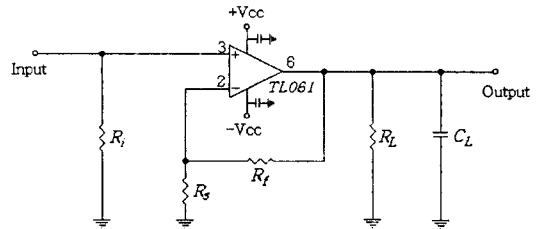


그림 3 증폭 회로

Fig. 3 Circuit of the amplifier



그림 4 전장측정기의 사진

Fig. 4 Photograph of the electric field meter

4. 실험 장치 및 방법

전장측정기의 주파수 대역과 측정감도 등 특성 파악을 위하여 교정용 실험장치를 구성하였다. 교정 실험계는 외부노이즈에 의한 전장의 왜곡이 없이 평등전장을 얻을 수 있도록 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계로 구성하여 특성을 비교하였다^{[7][8]}.

원통형 가드전극계의 교정용 실험장치는 그림 5와 같이 외부에너지에 의한 표류전장을 가드전극으로 차폐시키고, 고정밀도의 기계적 안정도를 얻기 위하여 높이 100[mm]인 원주형 가드전극을 사용하여 평판형 전장센서의 가장자리에서도 최대 전장의 변화가 0.1[%] 이하가 되는 완전한 평등전장이 형성되도록 하였다. 또한 전극사이에 흐르는 전류량을 줄이기 위하여 각 전극간에 10[Ω]의 저항을 직렬로 연결하여 총 저항값을 50[Ω]으로 함으로써 교정용 신호 발생장치의 출력 임피던스 50[Ω]과 정합시켰다. 원통형 가드전극계에서 발생하는 평등전장의 세기는 가드 전극계의 높이가 100[mm]이므로 10[V]의 신호가 인가될 때 100[V/m]가 되도록 하여 센서의 감도평가에 용이하도록 설계하였다.

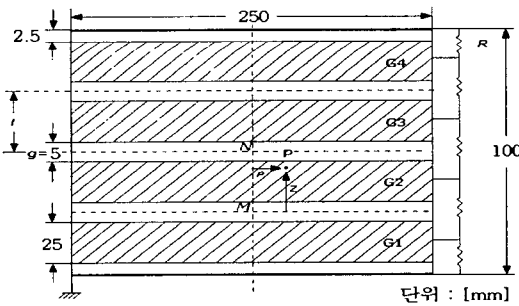


그림 5 원통형 가드전극계의 개략도
Fig. 5 Schematic diagram of the cylindrical guard electrode system

가드전극계가 그림 5와 같이 구성되어 있고 전극 G₁, G₂, G₃의 전위가 각각 $-1/2\Delta V$, $1/2\Delta V$, $3/2\Delta V$ 이고 M, N점의 전위가 각각 0, ΔV 라 한다. 전극간 공극의 중앙인 평면의 중심으로부터 z, 수평축으로부터 ρ만큼 떨어진 점 P의 전위는 식 (12)와 같이 표현된다^{[9],[10]}.

$$\psi_0 = \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi mg/l)}{\pi mg/l} \frac{\sin(2\pi mz/l)}{2\pi mz/l} \frac{J_0(2\pi m\rho/l)}{J_0(2\pi mR/l)} \right] \frac{z}{l} \Delta V \quad (12)$$

여기서 g는 갭의 길이, l은 인접전극의 중심간 거리, R은 센서의 반경, J₀는 영차 BESSEL 함수, m은 정의의 우수이다.

센서 감지면에서 평등전장의 영역을 넓히기 위해 l = 30 [mm], g = 5 [mm], R = 250 [mm]로 하였으며, 이들의 값과 m = 2로 하고 그 이상의 값을 무시하여 계산한 전위값 $\psi_0 = \Delta V z/l$ 로 나눈 것은, 센서 감지부에서의 전장변화가 최대 0.3 [%] 이하의 평등전장이 형성되었다.

평행평판 전극계는 그림 6과 같이 두 개의 사각평판을 이용하여 전장센서의 입사면에서 평등 전장이 형성되도록 구성하였다^[11]. 교정용 전극의 배치는 90 × 90[cm]의 정사각형 평판을 이격거리 30[cm]로 평행하게 설치하고, 평판 전극 주위에 원형강 파이프를 부착하였다. 본 연구에서 제작한 평행평판 전극계는 감지센서면에서 최대 전장의 변화가 1.5[%] 이하이며, 평판 전극 사이에 30[V]의 입력전원이 가해질 때 인가되는 전장의 세기는 100[V/m]가 된다.

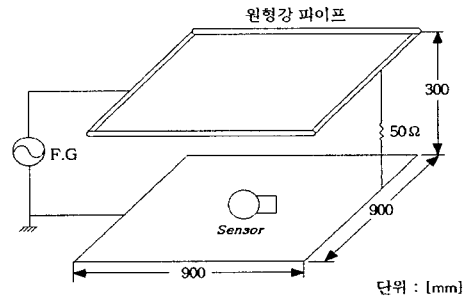


그림 6 평행평판 전극계의 개략도
Fig. 6 Schematic diagram of the parallel-plate electrode system

시제작한 전장측정기의 주파수 응답특성을 알아보기 위하여 원통형 가드전극계와 평판형 전극계에 함수발생기(FG-2002C, 0.1[Hz] ~ 2.1[MHz], LG 전자)를 입력전원으로 하는 주파수 응답 측정장치를 구성하였다. 함수발생기의 주파수를 10[Hz] ~ 10[kHz]로 변화시키면서 전장측정기의 응답특성을 조사하였으며, 교정 실험계의 개략도와 사진을 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

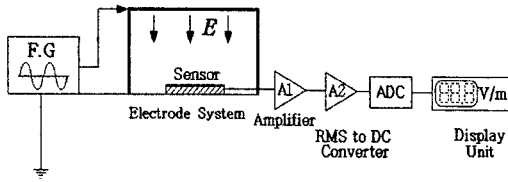
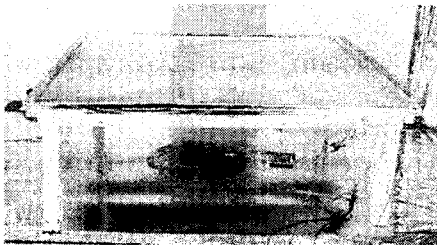


그림 7 교정용 실험장치의 개략도

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental apparatus for calibration.



(a) 원통형 가드전극계



(b) 평행평판 전극계

그림 8 교정용 실험장치의 사진

Fig. 8 Photograph of the experimental apparatus for calibration

5. 실험 결과 및 고찰

전장측정기로서의 주파수 응답과 측정감도에 대한 특성평가 결과를 그림 9와 10에 나타내었다. -3 [dB]의 주파수 대역이 하한 17 [Hz], 상한 7 [kHz]이므로 60 [Hz] 상용주파수의 전력선비 주변에서 발생하는 시변 전장은 물론, 2 [kHz]내의 전장세기를 0.5 [%]이내의 오차로 측정할 수 있다.

그림 10은 60 [Hz]의 상용주파수 전장에 대한 전장측정기의 출력 파형을 나타낸 것으로 파형의 왜곡없이

정확하게 검출되었으며, 이 출력은 실효값 변환기 (RMS to DC converter)와 A/D변환기를 통하여 LCD로 출력된다. 감도산출을 위한 교정실험에서 전장측정기의 감도는 4.45 [mV/V/m]이었으며, 입사전장에 대한 전장측정기의 출력전압은 5 [V/m] ~ 10 [kV/m] 범위에서 선형적이었다.

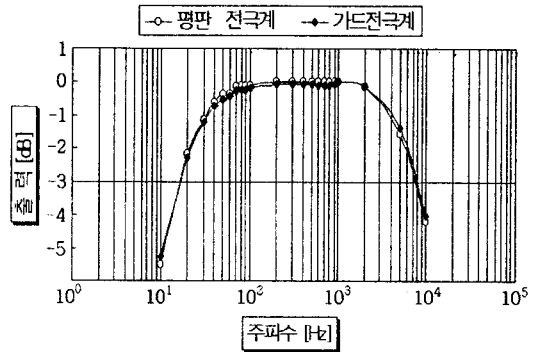
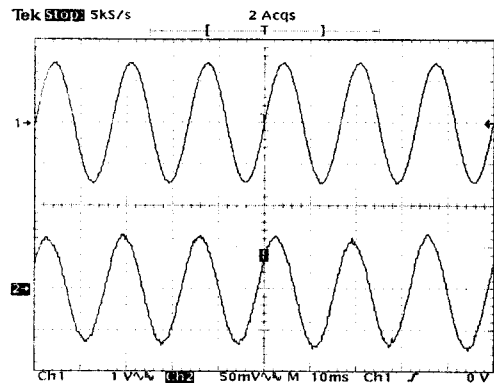


그림 9 전장측정기의 주파수 응답특성

Fig. 9 Frequency response characteristics of the electric field meter



상 : 인가전장 [10 V/m/div, 10ms/div]

하 : 측정전장 [50 mV/m/div, 10ms/div]

그림 10 상용주파수 전장 입력에 대한 전장측정기의 응답 파형

Fig. 10 Typical response waveforms of the electric field meter to commercial frequency electric field input

본 연구에서는 제안한 전장측정기는 접지면에 고정하여 교정장치 내에서만 측정하였으나, 실제 측정에 있

어서 측정 대상물에 접근하여 사용할 경우, 인체의 영향으로 전장의 분포가 왜곡되어 실제값과는 다르게 나타날 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 전장 측정시 인체에 의한 영향을 최소화하기 위하여 최종적으로 제작한 전장 측정기는 그림 11과 같이 피측정 대상물에 따라 30[cm]의 절연 손잡이를 사용하거나, 전장 측정기로부터 3[m]이상 떨어져서 측정이 가능한 지지대를 설치하여 센서의 접지면은 대지에 접지되는 구조로 하였다.



그림 11 개발된 전장측정기의 사진

Fig. 11 Photograph of the developed electric field meter

6. 결 론

본 연구에서는 가전기기 및 전력설비 주변에서 발생하는 전장의 세기를 측정할 목적으로 평판형 용량성 전장센서의 원리를 해석하고, 이를 이용한 휴대용 ELF 전장측정기를 설계·제작하였다. 또한 제작한 전장측정기의 주파수 대역과 측정감도 산출을 위한 교정실험장치로 평행평판 전극계(ANSI/IEEE Std. 644)와 원통형 전극계의 두 가지 교정방법을 제안하여 측정결과를 비교하였다.

실험결과로부터 평행평판 전극계와 원통형 전극계를 이용한 교정방법에는 차이가 없었다. 교정실험으로부터 시제작한 휴대용 ELF 전장측정기는 -3[dB]의 주파수 대역이 17 [Hz] ~ 7 [kHz]이었으며, 감도는 4.45 [mV/V/m]로 측정가능한 전장의 세기는 5 [V/m] ~ 10 [kV/m]이었다. 따라서 60 [Hz] 상용주파수에서 2 [kHz]

까지의 시변전장의 세기를 오차 0.5 [%] 이내로 측정가능함을 확인하였다.

본 연구의 결과로 개발된 휴대용 ELF 전장측정기는 일상 생활 주변에서 발생하는 ELF 대역의 전장측정에 광범위하게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 광주지방 중소기업청의 기술지도사업의 일환으로 수행되었으며, (주) PULSE의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R.P. Corcoran, "Extremely low frequency exposure limits relative to military electrical/electronic system environments", IEEE Int., EMC symposium, pp. 62~67, 1992.
- [2] 신동천, 전자파 인체권고기준 설정을 위한 조사연구, 환경부 보고서, p. 161, 1997.9
- [3] REILLY, J.P., et al., "Electric and Magnetic Field Coupling from High-Voltage AC Power Transmission Lines - Classification of Short-Term Effect on People" IEEE Trans. PAS-97, pp. 2243~2251, 1978.
- [4] Gauger, J. R., "Household Appliance Magnetic Field Survey", IEEE Trans. on PAS 104-9, pp. 2436~2444, 1985.
- [5] John D. Kraus, "Electromagnetics", Mcgraw-Hill International Editions, pp. 392~412, 612~715, 1988.
- [6] R. H. Mcknight, "Measuring Fast-Rise Impulses by use of E-dot Sensor", 5th (ISH) No. 32.07, Aug. 1987.
- [7] "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Field From AC Power Lines", ANSI/IEEE Std. 644, 1987.
- [8] R. W. Crompton, M. T. Elford, and J. Gascoigne, "Precision measurements of the Townsend energy ratio for electron swarms in highly

uniform electric fields", J. Phy. Vol.18, pp. 409~436, 1965.

[9] R. W. Crompton, M. T. Elford, and J. Gascoigne, "Precision measurements of the Townsend energy ratio for electron swarms in highly uniform electric fields", Aust. J. Phys., Vol. 18, pp. 409~436, 1965.

[10] A. Gilardini, "Low energy electron collision in gases", John Wiley and Sons, Inc., 1972, pp. 164~166.

[11] T. Takima, T. Kawamoto, and Y. Sunaga, "Analysis of Calibration Arrangements for AC Field Strength Meters", IEEE Trans. on PAS 104-9, pp. 489~495, 1985.

著 者 紹 介



길경석

1962년 6월 30일생

1984년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1987년 2월 인하대 대학원 전기공학과(공학석사), 1996년 2월 인하대 대학원 전기공학과(공학박사), 1996년 4월~현재 한국해

양대 공대 전기시스템공학과 조교수

주관심분야 : 고전압발생 및 계측, 서지방호기술, EMI/EMC,

송재용

1975년 1월 28일생

1997년 2월 한국해양대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 2월 한국해양대 대학원 전기공학과(공학석사)

2000년 3월 한국해양대 대학원 전기공학과(박사과정)

주관심분야 : 고전압발생 및 계측, 전력설비 진단기술, EMI/EMC

김일권

1974년 1월 24일생

1997년 2월 한국해양대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 3월 한국해양대 대학원 전기공학과(석사과정), 주관심

분야 : EMI/EMC, 전력설비 진단기술, 접지기술