

논문 95-4-1-03

## 시변전장 측정용 평판형 센서

이복희(李福熙)\*, 길경석(吉暲碩)\*\*

## Planar-type Sensor for Measuring the Time-varying Electric Fields

Bok-Hee Lee\*, Gyung-Suk Kil\*\*

## 요 약

본 논문은 시변전장을 측정할 수 있는 평판형 센서에 대하여 기술하였다. 광대역의 전장측정계를 구현하기 위한 평판형 센서가 제안되었다. 측정계의 이론적인 원리와 설계방법에 대하여 제시하였으며, 교정실험 및 적용실험을 수행하였다. 교정실험을 통하여 전장측정계의 주파수대역과 감도는 160 [Hz] ~ 25 [MHz], 1.2 [mV/V/m] 이었다. 적용실험으로 고전압 실험실에서 임펄스전압과 진동성 과도전압에 의해 발생하는 전장을 제안된 측정장치로 측정하였으며, 측정결과는 우수하였다.

## Abstract

This paper deals with the planar-type sensor which can measure the time-varying electric fields. To make an electric field measurement system having a wide bandwidth, a planar-type sensor is proposed. The theoretical principle and design rule of the measuring device are introduced, and also the calibration and application investigations are carried out.

From the calibration experiments, the frequency bandwidth of the electric field measurement device ranges from 160 [Hz] to 25 [MHz] and the sensitivity of the sensor is 1.2 [mV/V/m]. As the application experiments, the electric fields caused by the impulse and oscillating transient voltage in high voltage laboratory are measured by the proposed device, and the results are excellent.

## 1. 서 론

전력 및 통신기술의 발달과 더불어 산업사회시스템이 고도화되고, 전력수요가 급증함에 따라 장거리 대용량, 전력계통의 고안정도, 송전효율의 극대화를 위한 극초고압(Ultra-High Voltage) 송전에 대한 연구가 진행되고 있으며, 뇌임펄스전압과 개폐장치에 대한 전력

계통의 절연설계와 절연협조(Insulation Coordination), 가스절연개폐장치나 가스차단기, 가스절연변압기 등 고성능 전력기기의 개발과 운용의 신뢰성 향상에 대한 관심과 연구가 집중되고 있다.<sup>[1]-[3]</sup>

전력설비의 대형화와 고전압화로 전력기기에 대한 고전압 대전류시험의 중요성이 점점 부각되고 있으며, 표준충격파 전압시험 뿐만 아니라 급상승 과도전압시험, 차단파 전압시험에 있어서 시험전압 및 특성치의 고정도 측정이 요구되고 있다. 이에 부수하여 방사되는 전자파의 영향과 장애도 극심하여 전자계 환경도 가혹해지고 있다.

\* 인하대학교 공과대학 전기공학과 부교수

\*\* 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
(Dept. of Electrical Engineering, College of Engineering, Inha University)

&lt;접수일자 : 1995년 1월 16일&gt;

또한 초고압 송전선 주변의 전자파원은 전력기기의 제어장치나 보호계전기 등 전자기기 및 컴퓨터와 같은 소세력 기기의 오동작을 초래하고, 인체에 위해를 미치게 되므로 이에 대한 영향의 평가와 대책의 수립 및 뇌방전 현상의 해석에 있어서 공간전장의 세기와 성분을 파악하는 것은 대단히 중요하며, 이 분야에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>[4][5]</sup>

본 연구에서는 전력설비의 운전조작시에 발생하는 뇌임펄스전압, 진동성 과도전압 및 초고압 송전선 주변의 전자파원 등 전자환경장해로서 작용하는 시변성 공간전장을 측정할 수 있는 센서를 설계 및 제작하였으며, 교정방법에 대한 연구를 수행하였다.

뇌임펄스전압, 진동성 과도전압 그리고 뇌방전에 의하여 방사되는 전장의 주파수 대역은 1 [Hz]에서 수백 [MHz]의 범위를 가지나 실제 전력계통에서 지배적으로 영향을 미치는 전장의 주파수 성분은 수십 [MHz]이내의 것이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 주파수 대역이 160 [Hz] ~ 25 [MHz]인 전장센서를 제작하였으며, 단위계단응답 특성과 주파수대역 결정을 위한 교정실험을 통하여 측정계의 기본특성을 파악하였다. 또한, 적용실험으로는 뇌임펄스전압과 진동성 과도전압에 의하여 발생하는 공간전장을 측정하였으며, 그 결과에 대하여 분석·검토하였다.

## 2. 전장센서의 설계 및 제작

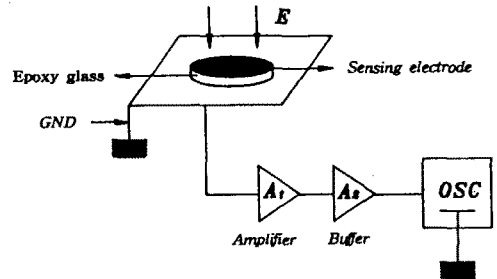
자유공간에 존재하는 전장의 수직성분을 산란없이 측정하는 데에는 평판형 센서가 가장 감도가 좋으며, 정확하게 감지할 수 있으므로 본 연구에서는 평판형 전장센서를 설계, 제작하였으며 이의 개략도와 등가회로를 그림 1에 나타내었다. 그림 1 (b)의 등가회로에서 전장센서의 출력전압  $V$  [V]와 인가전장의 세기  $E$  [V/m]사이의 관계는 센서의 감지전극과 대지사이의 정전용량을  $C$  [F], 센서의 감지면적을  $A$  [m<sup>2</sup>], 증폭기의 입력임피던스를  $R_i$  [ $\Omega$ ], 증폭도를  $M$ 이라고 하면

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

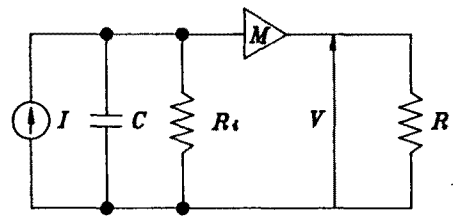
로 되며,  $f \gg 1/2\pi CR_i$  인 주파수에 대하여 출력전압은

$$V = \frac{\epsilon AM}{C} E \quad (2)$$

로 표현된다.



(a) 개략도



(b) 등가회로

그림 1 전장측정계의 개략도와 등가회로

Fig. 1 Schematic diagram and equivalent circuit of the electric field measurement device

센서의 구성재료로는 동피를 입힌 유리에폭시기판을 사용하였는데 유리에폭시기판의 두께가 1.6 [mm], 비유전율 3.5이고, 동피는 두께가 0.034 [mm]이며 센서의 감지전극의 반경은 10.1 [cm]로 센서의 정전용량은 약 0.8 [nF]이 된다. 그리고 신호전송용 케이블로는 고주파 특성이 우수하고 특성임피던스가 50 [ $\Omega$ ]인 동축케이블 RG-58/AU를 사용하였다. 또한 정육면체의 차폐함을 제작하고 2개의 감지면을 취부하고 증폭기 등 전자회로를 내장할 수 있도록 하여 잡음에 의한 신호의 왜곡을 최소화하였다. 센서에 의해서 감지된 신호는 시도함수로 나타나기 때문에 실신호로 출력시키기 위하여 수동성 적분기와 증폭회로를 구성하였으며, 광대역의 전장을 검출하기 위해 주파수 대역이 160 [Hz] ~ 25 [MHz]인 시변 전장측정계를 구성하였다. 연산증폭기로는 주파수대역이 DC ~ 70 [MHz]에 이르는 LH0032를 사용하였고, 신호전송에 사용된 동축케이블 (RG-58/AU)의 정전용량  $C_k$ (단위길이당 정전용량 : 90

~100 [pF/m])에 의해서 실신호에 상당한 왜곡을 가져 오기 때문에 이 영향을 제거하기 위해 증폭기 후단에 전압버퍼를 연결하고 이를 통하여 신호를 전송시켰다. 이 전압버퍼에 사용된 연산증폭기로는 DC ~ 100 [MHz]의 주파수대역을 갖는 LH0033을 사용하였다. 시 제작된 전장측정계의 개략도를 그림 2에 나타내었다.

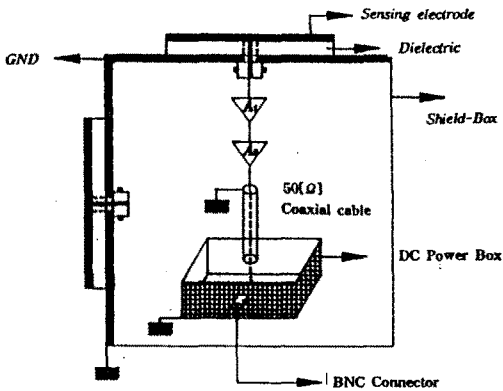


그림 2 전장측정계의 개략도  
Fig. 2 Schematic diagram of the electric field measurement device.

### 3. 실험계의 구성 및 방법

#### 3.1 교정실험

센서의 응답도와 주파수 대역 등 계측기로서의 기본성능을 알아보기 위해서는 단위계단응답 특성의 측정이 필요하므로 전장의 입력신호의 전송에 필요한 교정실험계를 설계, 제작하였다. 본 실험에서 제작한 교정실험계는 외부노이즈에 의한 전장의 왜곡이 없는 평등전장을 얻을 수 있도록 가드전극계를 구성하였다.<sup>[5][6]</sup>

시 제작된 평판형 전장센서의 단위계단응답 특성을 측정하기 위하여 입력전원으로는 상승시간이 약 5 [ns] 이고, 최대 출력전압이 20 [V]인 펄스발생기(Pulse generator ; P.G : WaveTek. 801)를 사용하였으며, 입력전압과 센서의 응답인 출력신호의 파형 관측에는 350 [MHz]의 대역폭을 가지는 추적형 오실로스코프(Tektronix 2440)를 사용하였다.

또한 저역측 차단주파수를 산출하기 위하여 주파수 응답 측정계를 구성하고 함수발생기(Function generator ; F.G : FG-1880)를 입력전원으로 하여 교정실험을 수행하였다. 전송선로를 포함한 교정실험계의 개략도를

그림 3에 나타내었다.

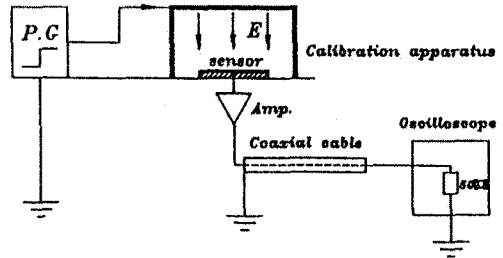


그림 3 교정실험계  
Fig. 3 Calibration experiment system

#### 3.2 적용실험

전장측정계에 대한 적용실험으로는 임펄스전압 발생장치(L.G)와 진동과전압 발생장치의 운전조작시에 발생하는 과도전장을 시 제작된 전장측정계와 주파수대역이 40 [Hz] ~ 200 [MHz]을 갖는 용량성 분압기로 인가전압과 주변의 전장을 각각 동시에 측정하였으며, 또한 공간전장의 수직축 성분(Y)과 수평축 성분(X)을 동시에 측정하고 비교, 분석하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 교정실험결과

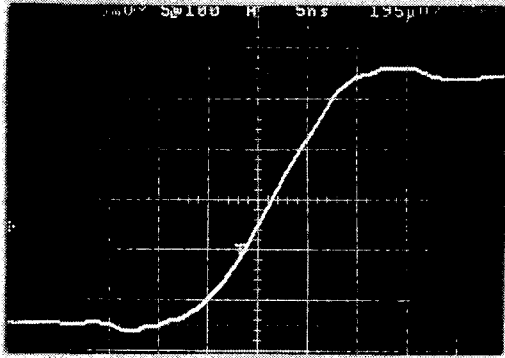
그림 4(a)는 직각과 입력전장에 대한 전장측정계의 응답파형을 나타낸 것이며, 이 결과로부터 오우버슈우트가 거의 없으므로 전송선로 및 측정계의 임피던스정합이 잘 이루어져 있어 센서의 기본성능을 파악하는데 충분한 정확도를 갖음을 알 수 있으며, 전장측정계의 응답의 상승시간은 14 [ns]이었다.

그림 4(b)는 센서의 감쇠시정수를 산출하기 위하여 측정된 단위계단응답의 전체 파형이며, 응답의 감쇠시정수 즉, 최대 응답의 1/e배로 감쇠되는데 소요되는 시간을 산출하였는데 전장측정계의 감쇠시정수는 1 [ms] 임을 알 수 있다.

감도계산에 있어 교정실험계를 통하여 100 [V/m]의 전장을 인가하였을 경우 전장측정계로는 120 [mV]의 출력전압을 얻을 수 있었다.

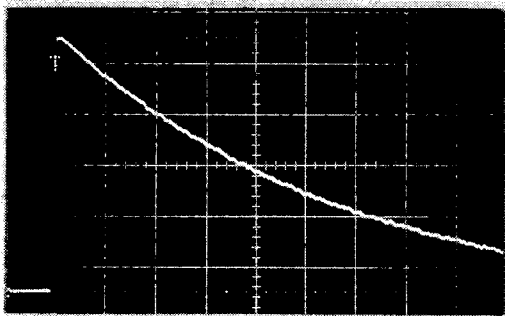
이상으로 다음과 같은 전장측정계의 기본특성에 대한 결과를 얻을 수 있었다.

- \* 주파수대역(bandwidth) : 160 [Hz] ~ 25 [MHz]
- \* 감도(sensitivity) : 1.2 [mV/V/m]



[ 5 mV/div, 5ns/div ]

(a) 상승부분



[ 20 mV/div, 200 µs/div ]

(b) 감쇠특성

그림 4 평판형 전장측정계의 단위계단응답 파형  
Fig. 4 Waveforms of unit step response of the planar-type electric field measurement system

4.2. 적용실험 결과

제작된 전장측정계의 적용실험은 임펄스 발생장치와 GIS모의실험장치를 갖춘 고전압실험실에서 수행하였으며, 여러 가지 실험기기의 배치에 대한 개략도와 측정위치를 그림 5에 나타내었다. 발생된 뇌임펄스전압과 진동성 과도전압은 임펄스 발생장치로부터 약 3 [m] 가량 떨어진 곳에 위치한 GIS모의실험장치로 인가되며, 이 때의 인가전압을 용량성전계센서<sup>[7]</sup>로, 주변에서 발생하는 전장을 본 연구에서 제안한 전장측정계로 동시에 측정하여 얻어진 파형들을 상호 비교, 분석

하였다.

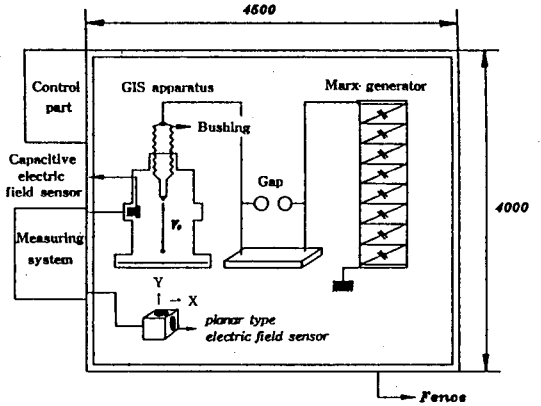


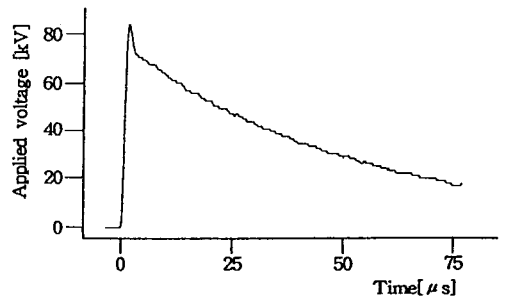
그림 5 실험기기의 배치와 측정점

Fig. 5 Configuration of the experimental apparatus and measuring point

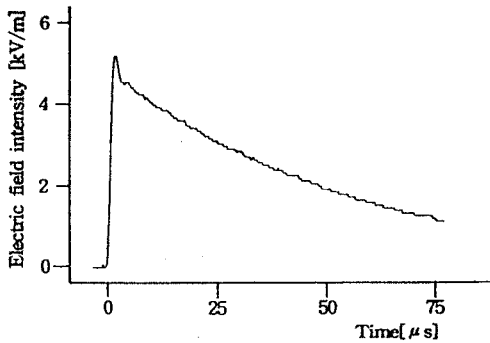
그림 5에서 보는 바와 같이 용량성 전장센서는 GIS모의실험장치의 내부에 장착시켰으며, 본 연구에서 제안한 전장센서는 외부에 노출시킨 상태에서 고전압 실험실내의 공간전장성분을 측정하였다.

4.2.1 뇌임펄스 전압에 의한 전장

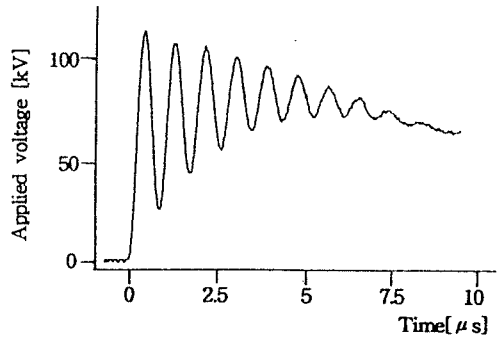
임펄스전압 발생장치에 의하여 1.7/44 [µs]의 파두장(T<sub>p</sub>)과 파미장(T<sub>m</sub>)을 갖는 뇌임펄스전압을 발생시켰으며, 이 때 발생하는 전장성분을 고전압 발생장치의 직렬갭으로부터 3 [m] 떨어진 위치에서 제작된 전장측정계를 설치하여 측정하였다. 그림 6은 측정된 인가전압과 전장 파형의 예를 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 전장의 파형과 전압의 파형이 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 전장의 세기는 수평성분이 약간 크게 나타났다.



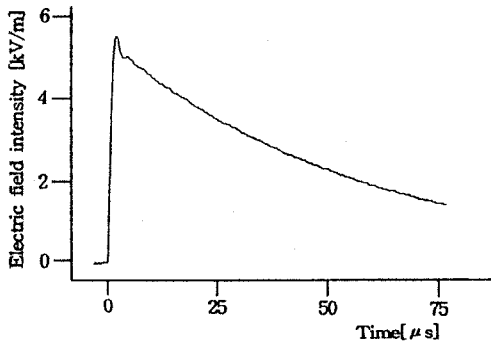
(a) 인가전압의 파형



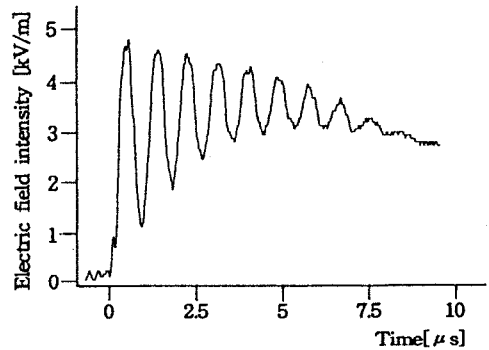
(b) 전장측정계의 응답(수직성분-Y)



(a) 인가전압의 파형



(c) 전장측정계의 응답(수평성분-X)



(b) 전장측정계의 응답(수직성분-Y)

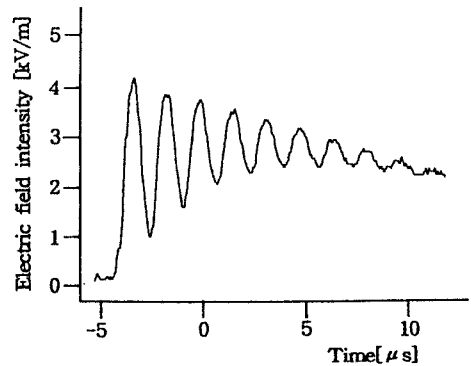
그림 6 임펄스전압과 전장 파형

Fig. 6 Electric field waveforms caused by the impulse voltage

4.2.2 진동성 과도전압에 의한 전장

Marx 임펄스 발생장치와 모의 GIS실험장치사이에 인덕턴스와 직렬갭을 설치하여 0.4 [ $\mu$ s] / 1.14 [MHz] 인 진동성 과도전압을 발생시켰을 때, 인가전압과 동시에 측정된 전장 파형의 예를 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 보는 바와 같이 전장측정계는 인가전압의 파형에 비해 제 1의 상승부분과 각각의 피크치 부분에서 고주파 성분이 약간 포함되어 나타났다. 이것은 전압측정을 위한 용량성 분압기는 차폐된 실험장치 내에서 전압을 측정하는 반면 전장측정계는 고전압 발생장치로부터 노출되어 트리거부 직렬갭의 방전에 따른 높은 주파수 성분과 센서 증폭기의 열잡음, 접지계로부터 유입되는 노이즈 등이 포함되어 나타난 것으로 생각된다. 그러나 인가전압과 전장파형들의 감쇠비와



(c) 전장측정계의 응답(수평성분-X)

그림 7 진동성 과도전압에 의한 전장 파형

Fig. 7 Electric field waveforms caused by the oscillation transient voltage

진동주파수는 거의 일치함을 알 수 있었다.

즉, 전장측정계의 응답특성과 잡음에 대한 내성이

강하여 강전자계에 대한 오차는 거의 없음을 확인할 수 있다. 직접적으로 피측정 전장에 의하여 본 연구에서 제안한 시변전장 측정계의 잡음의 정도와 오차유발은 정량적으로 평가와 해석은 할 수 없었으나 300 [kV]의 임펄스전압을 발생시킨 때에도 측정치에 커다란 변동이 없는 것으로 보아 전자계차폐와 전도잡음에 대한 차폐도 효과적으로 이루어졌음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전력기기의 운전조작시에 발생하는 임펄스전압 또는 진동성 과도고전압에 의한 과도전장 등 전자환경장해로서 작용하는 시변 공간전장을 측정할 수 있는 평판형 전장센서와 측정계를 설계, 제작하였다. 시제작된 전장측정계에 대한 교정실험 및 적용실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제안된 전장센서는 평판형 구조로 주파수대역은 160 [Hz] ~ 25 [MHz]이며, 응답감도는 1.2 [mV/V/m]의 고감도로서 전력기기 주변의 미소 전장도 안정하게 측정 가능하였다.
- (2) 교정실험계의 특성은 매우 안정하였으며, 적용실험의 결과가 거의 일치하였으므로 센서의 기본성능과 특성 파악에 대한 교정실험의 정확도가 우수하였음이 확인되었다.
- (3) 실규모 모의고전압실험을 통하여 전력계통에서 발생하는 과도전장을 측정하였으며, 본 연구방법을 적용함으로써 전력계통의 고장 또는 전력기기의 운전조작시에 발생하는 과도찌지에 대한 측정으로 소재력 회로에 잡음으로 작용하는 과도전장의 분석과 평가, 전자환경장해대책의 수립에 기본이 되는 노이즈원의 파악을 위한 전장측정계가 구현되었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소의 주관으로 수행되었으며, 연구의 수행중에 많은 도움을 준 대우중공업(주) 이성현 연구원에게 감사 드립니다.

## REFERENCE

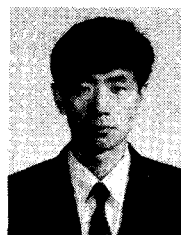
- [1] D. Lightle et al ; "Measuring of GIS at ultra high frequency", 6th International symposium on high voltage engineering(ISH), 23.02 Aug. 28~Sep. 1, 1989.
- [2] 백용현, 하성철, 이복희 ; "광대역고전압 및 전자계측정용 센서의 개발", 한국과학재단, KOSEF 901-0704-009-2, pp. 8~14, 1992.
- [3] A. Schwab, and J. Pagel ; "Precision Capacitive Voltage Divider for Impulse Voltage Measurements", IEEE Trans., PES Vol. 91, pp. 2376~2382, 1972
- [4] V. Fister and H. J. Koster ; "Condenser bushings as capacitive high voltage dividers for measuring of overvoltages in 420kV-substations", 4th ISH, No. 61.01, 1983.
- [5] 이복희 ; "高電壓大電流工學", 청문각, 1993, pp. 4~27.
- [6] 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.
- [7] 백용현, 이복희 ; "시변성 전자계측정용 센서에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 318~321, 1991.7.

## 著 者 紹 介



### 이 복 희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~1989년 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 현재 인하대 공대 전기공학과 부교수.



### 길 경 석 (吉喲碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.