

## 용량성 전장센서를 이용한 과도전압측정계

이복희, 길경석, 주문노, 이성현

Transient Voltage Measuring System  
Using the Capacitive Electric Field Sensor

Bok-Hee Lee, Gyung-Suk Kil, Mun-No Ju, Sung-Heon Lee

## 요 약

본 논문에서는 고전압 임펄스전압 발생장치의 조작에 의하여 발생하는 과도전압을 측정할 수 있는 용량성분 압기를 실현하였다. 전장센서를 이용한 과도전압측정계는 고속응답의 평판형 전장센서와 광대역 전압버퍼로 구성되었으며, 사용된 전압버퍼(LH0033)의 입력임피던스는  $10^{12} \Omega$  정도로 대단히 높다. 단위계단 응답특성을 파악하기 위하여 새로운 교정방법을 제안하고, 설치조건에 따른 분압비 오차를 검토하였으며, 분압비 오차를 0.5 % 이내로 하기 위한 최적설치조건을 제시하였다. 교정실험으로부터 과도전압측정계의 응답시간은 약 15.78 ns이었으며, 주파수대역은 6.37 Hz에서 27.3 MHz이다. 따라서 본 측정계로 과도과전압은 물론 상용주파수전압도 신호의 일그러짐 없이 측정이 가능하였다.

## Abstract

This paper deals with the capacitive voltage divider which can measure a transient voltages generated by operating a high voltage impulse generator. The transient voltage measuring system using the capacitive electric field sensor consists of the planar-type electric field sensor having a fast response characteristic and the wide-bandwidth voltage follower, and the input impedance of which is extremely high, about  $10^{12} \Omega$ . In order to analyze the response characteristics to a step input, the newly developed calibration method is proposed, and the error of voltage dividing ratio associated with set-up condition is investigated. Also the optimal set-up condition that is to be maintained within the range of 0.5 % is taken. From the calibration experiment, the frequency bandwidth of the transient voltage measuring system whose response time to a step input is about 15.8 ns, is from 6.37 Hz to 27.3 MHz. Therefore it is possible to measure the commercial frequency voltages as well as the transient overvoltages without signal distortions.

## 1. 서 론

여러 가지 전기설비의 제어 및 보호기기가 전자화됨에 따라 전원으로부터 유입되는 노이즈, 낙뢰 및 유도뢰에 의한 써-지의 침입, 계통의 차단기, 개폐기의

조작으로 인한 과전압의 발생은 주변 보호 및 계측제어설비의 오동작과 회로의 파손 등 심각한 영향을 초래하고 있다. 따라서 전력설비의 높은 신뢰성과 안정성 확보를 위하여 전력기기에 대한 고전압·대전류시험의 중요성이 점차 부각되고 있으며, 표준 충격과전압 시험 뿐만 아니라 급준성 과도전압시험, 재단과전압시험에 있어서 시험전압 및 특성치의 고정도 측정이 요구되고 아울러 운전중 전류, 전압 등 계측정보를 신속, 정확하게 전송할 필요가 있다.<sup>[1][2]</sup>

인하대학교 공과대학 전기공학과  
(Dept. of Electrical Engineering, College of  
Engineering, Inha University)  
<접수일자 : 1996년 3월 25일>

송전전압이 극초고압화 됨에 따라 계측장치가 커지고 제작비가 많이 들게 되는 등의 많은 어려움에 부딪히므로 새로운 방식의 계측기법의 개발이 절실히 요구되고 있다. 종래에 고전압 전력기기의 시험전압측정에는 저항분압기, 콘덴서분압기 등이 사용되어 왔는데 이들은 응답속도가 느려 주파수대역이 제한되고 주변 전자기장의 영향으로 계측의 정확성이 떨어진다. 또한 형체도 대단히 크므로 많은 공간을 필요로 할 뿐만 아니라 가격도 비싸고 현장측정을 위한 이동이 매우 어려운 단점을 가지고 있다.<sup>[3]</sup>

본 연구에서는 이러한 문제점의 적극적인 해결방법으로 피측정 장치에 영향을 주지 않는 과도전압 측정 장치의 개발을 목적으로 측정장치의 동작원리에 대한 이론적 해석과 전장센서의 설계 및 제작, 교정방법에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 계측기로 이용하기 위해서 새로운 교정방법을 제안하고, 단위계단 응답특성과 주파수대역 등 계측기로서의 기본특성을 파악한 후, 실규모 400 kV급 충격전압 발생장치를 이용하여 적용실험을 수행한 결과 상용주파수전압에서 과도과전압에 이르기 까지 충분한 계측성능이 있음을 확인하였다.

## 2. 이론

### 2.1 용량성 전장센서

용량성 전장센서의 동작원리는 감지전극과 피측정대상인 고전압도체사이의 표류정전용량과 전장센서의 정전용량에 의한 분압으로 고전압을 측정하는 것으로 이는 일종의 광대역 필터에 해당한다.<sup>[4],[5]</sup> 용량성 전장센서를 이용한 과도전압측정의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

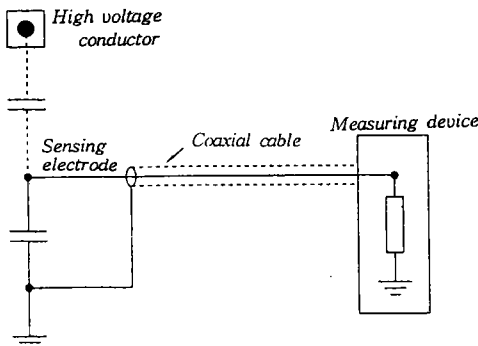


그림 1. 용량성 분압기의 측정계  
Fig. 1. Measuring system of capacitive voltage divider

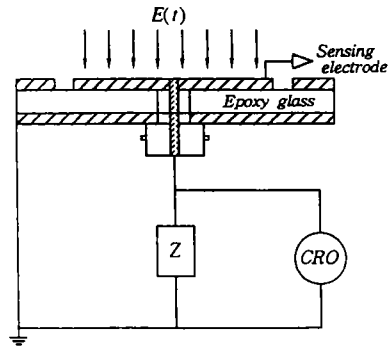
자유공간 전장의 수직성분을 산란없이 측정하는 데에는 평판형 센서가 가장 감도가 좋으며, 정확하게 감지할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 감지면이 대지면에 대하여 평행으로 놓일 수 있는 평판형 전장센서를 설계·제작하였으며, 이의 개략도와 등가회로를 그림 2에 나타내었다. 전장센서의 출력전압  $v(t)$  V와 인가전장의 세기  $E(t)$  V/m사이의 관계는 센서의 정전용량을  $C$  F, 센서의 유효 감지면적을  $A$  m<sup>2</sup>, 출력임피던스를  $R$  Ω이라고 하면

$$\epsilon \cdot \frac{dE(t)}{dt} \cdot A = C \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R} = i_c(t) + i_R(t) \quad (1)$$

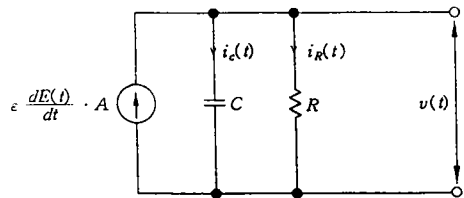
이 된다. 이 때 출력임피던스  $R$ 을 고임피던스로 하면  $i_c(t) \gg i_R(t)$ 로 되며, 식 (1)의  $v(t)$ 는

$$v(t) = \epsilon \frac{A}{C} E(t) = E(t) \cdot d \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서  $d$ 는 센서감지전극의 간격이다. 따라서 센서의 출력전압이 입사전장에 비례하므로 전장의 측정이 가능하다.



(a) Schematic diagram



(b) Equivalent circuit

그림 2. 전장센서의 개략도와 등가회로

Fig. 2. Schematic diagram and equivalent circuit of the electric field sensor

센서의 구성재료로는 두께 1.6 mm, 동박막 두께가 0.034 mm, 감지전극의 반경 8 cm인 유리에폭시판을 사용하였으며, 비유전율이 2.1으로 정전용량은 약 233 pF이다. 감지부 이외의 부분은 모두 차폐함내에 넣어서 외부잡음에 의한 신호의 왜곡을 최소화하였다. 또한 입사전장은 측정하고자 하는 미지의 과도전압에 비례하는 관계를 적용하여 전압의 측정에 이용할 수 있다.

검출된 신호는 주파수대역이 DC~100 MHz이고, 출력임피던스가 7 Ω인 전압버퍼(LH0033)에 43 [Ω]의 저항을 직렬로 연결하는 신호전송부를 거쳐 오실로스코프에 입력된다. 이의 개략도를 그림 3에 나타내었다.

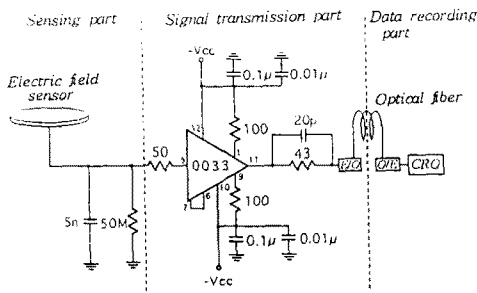


그림 3. 측정계의 구성도  
Fig. 3. Schematic diagram of the measuring system

한편, 센서의 응답도와 주파수대역 등 계측기로서의 기본성능을 알아보기 위해서는 단위계단 응답특성의 측정이 필요하므로 새로운 교정실험계를 설계, 제작하였다. 본 실험에서 제작한 교정실험계는 외부노이즈에 의한 전장의 왜곡이 없는 평등전장을 얻을 수 있도록 그림 4와 같은 가드전극계를 구성하였다.

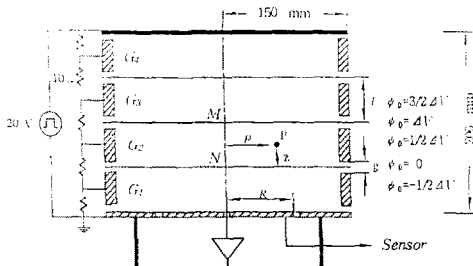


그림 4. 가드전극계의 구성  
Fig. 4. Configuration of the guard electrode system

전극간격의 중앙인 평면의 중심으로부터 z, 수평축

으로부터 ρ만큼 떨어진 점 P의 전위는 다음 식과 같이 표현된다.<sup>[6]</sup>

$$\psi_0 = \left[ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi mg/l)}{\pi mg/l} \frac{\sin(2\pi mz/l)}{2\pi mz/l} \frac{J_0(2\pi m\rho/l)}{J_0(2\pi mR/l)} \right] \frac{z}{l} \Delta V \quad (3)$$

여기서 g는 갭의 길이, l은 인접전극의 중심간 거리, R은 센서의 반경, J<sub>0</sub>는 영차 Bessel함수, m은 정의 우수이다.

평등전장영역을 넓히기 위해 l = 40 mm, g = 10 mm, R = 150 mm로 하여 계산 결과로부터 본 연구에서는 센서의 감지전극부에서의 전장변화가 최대 0.1% 이하의 평등전장이 형성됨을 알 수 있었다. 위에 기술한 조건을 근거로 하여 원통형 가드전극계를 제작하였으며, 전극사이의 전류를 줄이기 위하여 각 전극간에 10 Ω의 저항을 연결하였다. 가드전극계의 높이는 20 cm로 하여 20 V의 입력전원이 인가되었을 때 균등전장의 세기가 100 V/m가 되도록 설계하였다.

평판형 전장센서의 단위계단 응답특성을 측정하기 위하여 입력전원으로는 상승시간이 약 5 ns이고, 최대 출력전압이 20 V인 펄스발생기(WaveTek. 801)를 사용하였으며, 입력전압과 센서의 응답인 출력신호의 파형 관측에는 350 MHz의 대역폭을 가지는 기억형 오실로스코프(Tek. TDS 520)를 사용하였다. 또한 신호전송에는 광신호전송방식(E/O변환기(GaAsP계 고속발광다이오드), O/E변환기(PIN-photo diode) : 주파수대역 6.4 Hz~52.4 MHz)을 채택하여 주변의 전자장 영향을 최소화시켰다.

### 2.2 과도전압측정계 및 측정방법

평판형 전장센서를 이용하여 과도전압측정을 위한 측정계를 구성하였으며, 측정계는 크게 두 부분으로 나누어지는데, 인가전압에 대하여 전장을 형성하는 원형의 평판전극계와 평판형 전장센서를 포함한 측정계 및 기록장치로 되어 있다. 최종적으로 구성된 과도전압측정계의 개략도를 그림 5에 나타내었다.

측정할 과도전압에 대하여 평등전장을 형성하는 두 개의 평행평판전극계는 직경 950 mm, 전극간격 1 m로 설치하였으며, 상하 평행평판전극의 주위는 직경 45 mm의 금속파이프를 설치함으로써 평판끝에서의 전장을 완화시키도록 하였다. 전장센서는 하부평판전극의

중앙에 설치하였으며, 센서의 검출부 이외의 모든 신호 처리회로는 차폐함내에 넣어 주변의 고전자계로부터 영향을 받지 않도록 하였다. 최종적으로 미지전압신호는 오실로스코우프로 관측되며 개인용 컴퓨터에 저장된다.

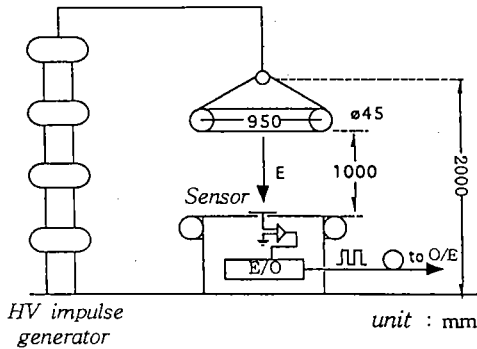


그림 5. 과도과전압측정계의 개략도

Fig. 5. Schematic diagram of the transient voltage measuring system

과도전압측정계의 기본특성을 파악하기 위하여 측정계의 직각과 응답특성을 조사하였다. 직각과 발생기로는 충전된 직류전압을 수은접점릴레이에 의해 차단하여 파형을 하강시키는 방법을 적용하여<sup>[7]</sup> 평행평판전극계의 입력단에 직각과 전압을 인가하였으며, 평판전극의 입력단에 제동저항 330 옴을 연결하여 상부평판전극과 대지간 표류정전용량의 영향으로 인한 진동을 제거하였다.

전압측정계는 표류정전용량에 의하여 분압된 전압을 검출하므로 평판전극과 대지간 사이의 표류정전용량이 변화하면 과도과전압측정계의 분압비가 변화하게 된다. 따라서 접지 또는 비접지된 주변장애물로부터의 거리와 고전압 인가시에 전장을 형성하는 평판전극의 간격 등 과도과전압측정계의 설치조건에 대한 분압비의 오차를 검토하였다.

전압측정계로부터 떨어져 있는 차폐판에 의한 분압비 오차를 조사하기 위하여 그림 6과 같이 실험계를 구성하였다. 차폐판 1매의 규격은 900 mm × 1800 mm의 금속판으로 제작하였으며, 과도과전압측정계로부터 0.1~1 m거리로 변화시키면서 실험조건에 따라 접지 또는 비접지로 하였다.

과도과전압측정계의 센서의 검출전극의 위치를 일정

히 하고 상부전극의 위치를 변화시키면서 응답파형으로부터 분압비를 산출하여 상·하전극사이의 전장분포 조건에 따른 응답특성을 조사하였다. 또한 적용실험으로 Marx충격전압 발생장치를 이용하여 비진동성 과도전압과 진동성과도전압을 300 kV까지 발생시켜 측정함으로써 본 측정계의 과도전압에 대한 성능을 조사하였다.

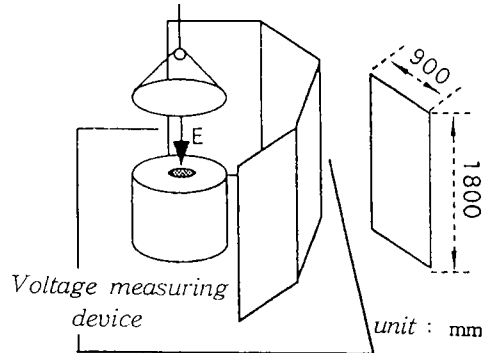


그림 6. 차폐판의 영향을 조사하기 위한 기기의 배치

Fig. 6. The test set up for investigating the influences of obstacles

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 평판형 전장센서

그림 7은 10 % ~ 90 % 상승시간이 7.4 ns인 직각과 입력에 대한 평판형 전장센서의 응답파형을 나타낸 것으로, 오버슈트와 반사 등에 의한 신호의 왜곡이 나타나지 않았다. 따라서 전송선로 및 측정계의 임피던스 정합이 잘 이루어져 있어 측정계의 기본성능을 파악하는데 충분한 정확도를 가짐을 알 수 있다.

입력파형의 상승시간이  $T_{ri}$  ns, 출력파형의 상승시간이  $T_{ro}$  ns일 때, 측정계의 순수상승시간  $T_r$  ns<sup>[8]</sup>는

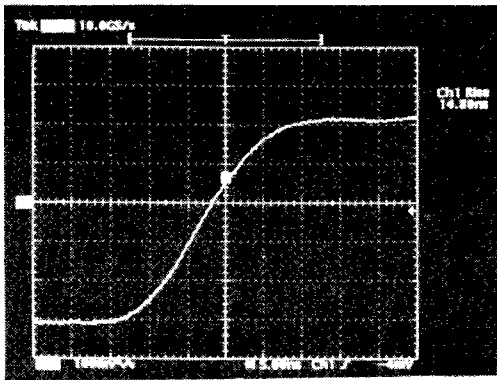
$$T_r = \sqrt{T_{ro}^2 - T_{ri}^2} \quad (4)$$

로부터 계단입력신호에 대한 전압측정계의 순수상승시간은 약 12.82 ns이다.

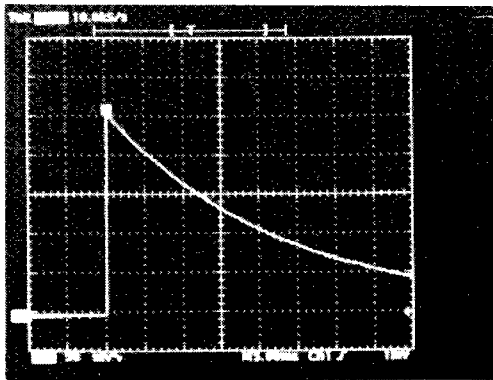
또한 측정계의 순수상승시간을 주파수대역폭의 관계로부터<sup>[9]</sup> 고역측 차단주파수를 산출한 결과, 약 27.3

MHz이다. 따라서 본 연구에서 시제작된 전압측정계는 수십 ns의 상승시간과 27.3 MHz이하의 고주파 성분을 포함하는 급준성 과도과전압의 측정이 가능함을 알 수 있다.

그림 7(b)에서 센서의 직각과응답의 감쇠시정수 즉, 최대응답의 -3 dB로 감쇠되는데 소요되는 시간을 산출하였는데, 전압측정계의 감쇠시정수는 25 ms임을 알 수 있다. 마찬가지로 저역측 차단주파수의 관계로부터<sup>[9]</sup> 산출한 결과와 함수발생기를 이용하여 측정된 응답의 -3 dB에 해당하는 저역측 차단주파수는 모두 약 6.4 Hz이었다.



5 ns/div  
(a) Rise time



5 ms/div  
(b) Decay time constant

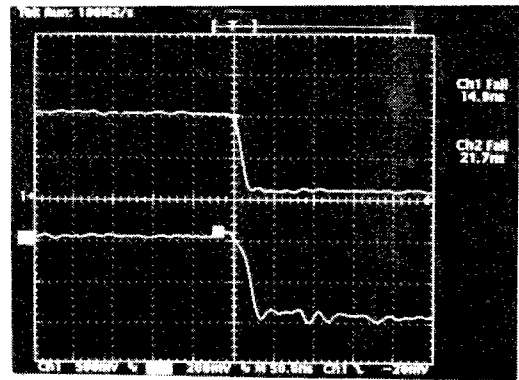
그림 7. 평판형 전장센서의 단위계단 응답파형  
Fig. 7. Waveforms of unit step response of the planar-type electric field sensor

### 3.2 과도전압측정계

#### 3.2.1 직각과 응답특성

평판전극에 직각과를 입력시켜 상하 평판전극사이에 입력되는 전압파형과 과도과전압측정계로부터 검출된 파형을 그림 8에 나타내었다. 입력전압의 하강시간은 14.9 ns이고 과도전압측정계의 응답하강시간은 21.7 ns이므로 전체측정계의 순수하강시간은 식 (4)로부터 15.8 ns이다. 따라서 주파수 대역의 상한인 고역측 차단주파수는 약 22.2 MHz임이 확인되었다.

한편, 측정계의 입력단에 인가되는 직각과의 하강시간이 길게 나타나는 것은 상부전극과 대지간 표류정전용량에 의한 오우버 슈트와 진동을 없애기 위하여 삽입한 330 Ω의 계동저항과 전압인가에 필요한 접속선의 인덕턴스에 의한 영향이다.



50 ns/div

upper : input waveform  
lower : output waveform of the transient voltage measuring device

그림 8. 입력전압과 과도전압측정계의 단위계단 응답파형

Fig. 8. Input voltage and unit step response waveforms of the transient voltage measuring system

#### 3.2.2 분압비 오차

과도전압측정계의 주변장애물로 차폐판에 의한 분압비 오차의 영향을 조사한 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 인가전압에 대한 전장을 형성하는 평행평판전극계에 접지 또는 비접지의 차폐판이 가까워짐에

따라 명백한 분압비 오차를 보이고 있다. 특히 이 차이는 접지된 차폐판에서 더욱 큰 오차를 보이고 있다. 따라서 본 측정계에 의한 과도전압의 측정시 분압비 오차를 0.5% 이내로 하기 위하여는 평판전극으로부터 비접지 장애물의 경우 0.5 m 이상, 접지된 장애물의 경우 최소한 1 m 이상 이격시켜야 함을 본 실험으로부터 알 수 있다.

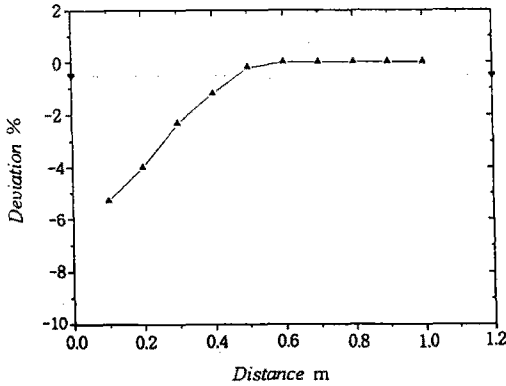


그림 9. 비접지 장애물에 의한 분압비 오차  
Fig. 9. The error of voltage dividing ratio caused by non-grounded obstacle

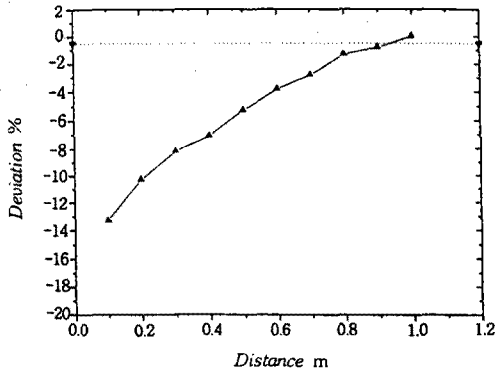


그림 10. 접지 장애물에 의한 분압비 오차  
Fig. 10. The error of dividing ratio caused by the grounded obstacle

### 3.2.3 평판전극간 거리변화에 따른 분압비

그림 11은 전압측정용 평행평판전극에 인가하는 전압을 일정하게 유지하고 평행평판전극의 거리를 변화시킬 때 과도전압측정계의 분압비를 나타낸 것이다.

전극사이의 거리가 변화하여도 선형적인 특성을 나타낸다. 그러나 평행평판전극간의 거리가 대단히 커서 평등전장으로부터 벗어나 평행평판전극간의 표류정전용량이 극히 작고 오히려 상부전극과 대지간의 표류정전용량이 증가하면 본 측정계의 특성은 현저히 달라지게 된다.

그러나 그림 11의 결과에서 평행평판전극사이의 거리에 대한 측정계의 응답은 편차없이 직선성을 보이고 있으므로 과도전압측정계의 감지전극부근에는 평등전장이 형성됨을 알 수 있으며, 연구범위내에서의 측정에 대한 오차는  $\pm 0.5\%$  이내이다.

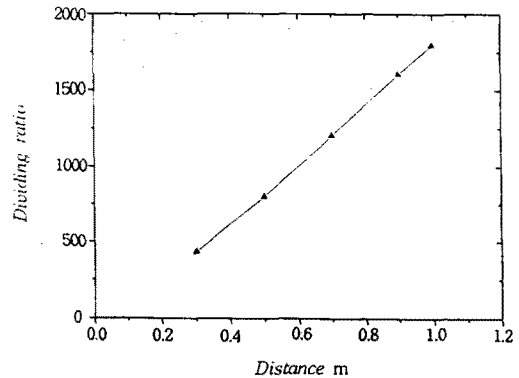


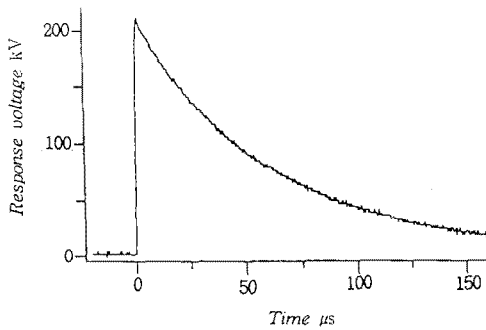
그림 11. 평행평판전극간 거리에 따른 분압비 변화  
Fig. 11. The variations of voltage dividing ratio with the distance between the parallel planar-type electrodes

### 3.3 적용실험결과

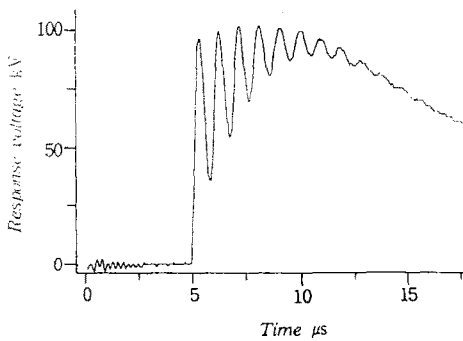
충격전압 발생장치로부터 발생된 과도전압은 충격전압 발생장치로부터 약 3 m 가량 떨어진 곳에 위치한 모의가스절연개폐장치로 인가되며, 이 때의 인가전압을 본 연구에서 제안한 과도전압측정계로 계측하였다.

충격전압 발생장치에 의하여 106 kV, 1.7/44  $\mu$ s의 비진동성 과도전압과 100 kV, 0.4 $\mu$ s/1.14 MHz 진동성 과도전압을 발생시켰을 때, 측정된 파형을 그림 12에 나타내었다.

본 연구에서 제안한 용량성 전장센서를 이용한 과도전압측정계는 비접촉방식으로 안전하고 부하효과가 없는 장점을 가지고 있으며, 분압비의 조정이 간편하고 정확도가 우수함을 확인하였다.



(a) Non-oscillating transient voltage(211 kV)



(b) Oscillating transient voltage(303 kV)

그림 12. 과도전압에 대한 과도전압측정계의 응답 파형의 예

Fig. 12. Examples of the response waveforms of the transient voltage measuring system to a transient voltage

#### 4. 결 론

피측정전압에 의한 전장을 직접 감지할수 있는 평판형 전장센서를 이용하여 비접촉식의 용량성 과도전압 측정계를 실현하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 과도전압측정계의 단위계단응답의 상승시간은 약 15.8 ns로 주파수 대역은 6.4 Hz~22.2 MHz이였며, 주파수대역과 분압비 조절이 용이한 장점을 가지고 있다.

(2) 과도전압측정계의 주변 장애물로부터 분압비 오차를 줄이기 위해서는 비접지도체의 경우 0.5 m 이상, 접지도체의 경우 1 m 이상 이격시켜야 하며, 주변시설물의 영향을 고려하여 정확도의 확보가 가능하다.

(3) 인가전압에 대하여 전장을 형성하는 평행평판전

극의 거리를 변화시킬 때 분압비 오차는  $\pm 0.5\%$  이내로 우수한 직선성을 나타내었다.

(4) 충격전압발생장치를 이용한 적용실험에서 본 측정계는 주파수대역 범위내의 400 kV이상의 과도전압을 측정할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] R. Liao, C. Sun, and X. Zhen, "Development of a Transient Voltage Measuring System," 8th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) no.54.16, pp.141~144, Aug. 1993.
- [2] T. Harada, T. Itami, and Y. Aoshima, "Resister divider with dividing element on high voltage side for impulse voltage measurement," IEEE 70 Trans. 576-PWR, 1970 Summer Power Meeting, Los Angeles, Calif., July, 1970.
- [3] Junich Hojo, Masaru Ishii, T. Kawamura, F. Suzuki, H. Komuro, and M. Shioyama, "Characteristics and evaluation of lightning field waveforms," J. IEE of Japan, vol. 108, no. 6, pp. 55~59, 1988.
- [4] A. Schwab and J. Pagel, "Precision Capacitive Voltage Divider for Impulse Voltage Measurements," IEEE Trans., PES vol. 91, pp.2376~2382, 1972
- [5] V. Fister and H. J. Koster, "Condenser bushings as capacitive high voltage dividers for measuring of overvoltages in 420 kV substations," 4th ISH, no.61.01, 1983.
- [6] A. Gilardini, "Low energy electron collision in gases," John Wiley and Sons, Inc., 1972, pp.164~166.
- [7] IEC Pub. 60-2, High voltage testing techniques, part 2, measuring system, International standard 1994
- [8] Edmund K. Miller, "Time-Domain Measurements in Electro-magnetics," Van Norstand Reinhold Co., 1986, pp.175~290.
- [9] 이복희, 안창환, 길경석, "뇌방전에 의하여 발생하는 전장의 자동측정시스템," 센서학회지, vol.

5, no. 2, pp.47~54, 1996.2

---

 著 者 紹 介
 

---

**이 복 희**

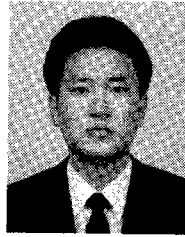
『센서학회지 제5권 제2호』 논문 96-5-2-05, p36 참조  
 현재 인하대학교 공대 전기공학과 부교수

**길 경 석**

『센서학회지 제5권 제2호』 논문 96-5-2-05, p36 참조  
 현재 한국해양대학교 이공대 전기공학과 전임강사

**이 성 현**

1966년 7월 17일생, 1993년 2월  
 인하대 전기공학과 졸업(공학사),  
 1995년 2월 인하대 대학원 전기공  
 학과 졸업(공학석사), 1996년 4월  
 현재 대우중공업 중앙연구소 로봇  
 트기술실 재직

**주 문 노**

1968년 7월 7일생, 1994년 인하대  
 공대 환경공학과 졸업(공학사),  
 1996년 인하대 대학원 전기공학과  
 졸업(공학석사)