

# 時變性 電界 測定用 센서에 관한 연구

李 福 熙\* 白 龍 鉉

인하대학교 공과대학 전기공학과

## A study on the sensor for measuring the transient electric fields

bok - Hee Lee\* Yong - Hyun Paek

Department of the electrical engineering, Inha university

**ABSTRACT**— For measuring the transient electromagnetic fields and related quantities created by disconnector operations in GIS, one needs the wide bandwidth sensors with simple transfer functions. This paper describes a new developed electric field sensor to measure the very fast transient electric fields and voltages, and the measuring principle, design and construction of planar electric field sensor are described.

A calibration and/or correction technique of the sensor is investigated which enables an accurate determination of the sensor response to the time-changing electric fields. As a consequence, the low voltage calibrations certify that a rise time of 1.7 [ns] is achieved for the planar electric field sensor and a total bandwidth extending from several Hz to 200 MHz for the measuring system which presents the constant division ratio as a function of frequency.

### 1. 서 론

최근 전력수요의 급증과 더불어 전력설비의 대형화와 고電壓化가 요구되고 있으며, 운전 및 보수에 간편화, 안전성, 고효율 운전특성이 우수한 SF<sub>6</sub>가스를 절연체로 하는 가스절연시스템의 사용이 증가하고 있다.

가스絶緣閉閉裝置(Gas-Insulated Switchgear:GIS)의 운전중 단기기 조작에 의한 송전전류의 차단으로 過渡過電壓(Very Fast Transients:VFT)과 시변성 전자계가 발생하게 된다. 이들의 파형이나 진폭은 전력설비의 규모, 발생지점, 주변의 기기에 따라 변화하며, 上昇時間이 4-20 [ns], 사용전압의 0.9-3.2 [p.u] 정도의 크기를 가지므로 전력설비의 절연을 위협하게 된다.

과도과전압은 발생하는 위치에 따라 進行波로 작용하며, 高周波成分을 포함하고 있기 때문에 종래의 저항 또는 용량분압기계의 측정이 불가능하므로 특별한 측정장치가 필요하다.<sup>1)~3)</sup>

또한 과도과전압은 가스절연개폐장치 자체 뿐만 아니라 주변 기기의 絶緣破壞를 유발시키게 되며, 보호 및 제어장치의 전자회로에도 電磁誘導障害를 미치는 영향 등 여러가지 문제점을 내포하고 있다. 따라서 가스절연개폐장치에서 발생하는 과도과전압의 정확한 측정은 고전압기계의 절연설계 및 운용의 신뢰도 향상에 기여한다.<sup>4),5)</sup>

최근 전기장학효과를 이용하는 전자계 측정용 센서가 많이 발달되어 왔다. 광센서의 급속센서에 비하여 피 측정전계의 왜곡이 없으며, 전자유도장해를 방지할 수 있고 소형화가 가능한 장점을 가지고 있지만 소자의 기계적 공진 때문에 주파수 대역이 제한을 받게 되어 수십 MHz이상의 고조파성분을 포함하는 전자계 측정용으로 적합하지 못하다.

따라서 본 연구에서는 수백 MHz의 고조파성분을 포함하는 가스절연개폐장치에서 발생하는 과도과전압과 시변성 전계를 정확하게 측정할 수 있는 광대역의 容量性電界센서에 대한 이론과 설계에 대하여 기술하며, 제작된 센서의 단위계단응답특성을 측정하여 應答度와 周波數帶域을 결정하는 고정실험을 수행하고, 모의실험을 통하여 실규모 시스템에서의 적용성을 검토하였다.

### 2. 이 론

#### 2.1 측정 이론

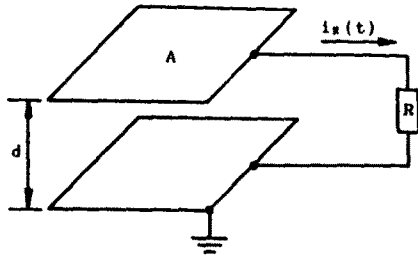
용량성 전압 센서의 동작원리는 電磁界 現象을 기초로 하며, 센서전극과 GIS내부에 설치된 고전압 도체 사이의 漂流靜電容량과 접지전극사이의 정전용량에 의한 분압으로 고전압을 측정하는 것으로, 일종의 廣帶域 필터에 상당하며 周波數應答은 관측용 계기의 입력임피던스와 센서의 정전용량에 의하여 결정된다.

본 연구에서 시도하는 용량성 전계센서의 동작원리는 맥스웰의 電磁方程式<sup>6)</sup>

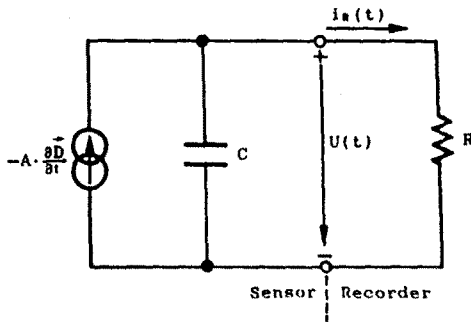
$$\nabla \times H = J(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (1)$$

으로부터 설명된다.

센서의 원리도와 테브난의 등가회로는 그림 1에 나타내었으며, 미지의 전압이 인가되게 되면 센서의 전극사이에는 전계가 형성되고 이 전계의 시간적 변화에 의하여 유기된 전압이 오실로스코우프로 관측된다.



(a) 원리도



(b) 테브난의 등가회로

그림 1. 전계센서의 원리  
Fig. 1. Principle of electric field sensor

센서전극과 고전압 도체사이에서 하전입자가 없다고 가정하면  $J(t) = 0$  이 되므로 식 (1)은

$$\frac{\partial D(t)}{\partial t} \cdot A = C \cdot \frac{\partial V(t)}{\partial t} + \frac{V(t)}{Z_0} \quad (2)$$

표현되어 미지의 전압  $V(t)$ 가 입사전계의 세기에 의하여 측정되게 된다. 그러나 오실로스코우프의 입력임피던스에 의하여 달라지게 되며, 오실로스코우프의 입력 임피던스가 1 [MΩ] 또는 10 [MΩ]인 경우는

$$C \cdot \frac{\partial V(t)}{\partial t} \gg \frac{V(t)}{Z_0} \text{로 근사화시키면 식 (2)는}$$

$$\frac{\partial D(t)}{\partial t} \cdot A = C \cdot \frac{\partial V(t)}{\partial t} \quad (3)$$

로 간단화된다. 따라서 미지전압은

$$V(t) = d \cdot E(t) \quad (4)$$

로 되어 입사전계의 세기에 직접 비례하게 된다. 즉, 센서의 감지량은 전극간격에 의하여 특징지어지며, 오실로스코우프의 입력임피던스가 積分器로서의 역할을 하게 된다.

측정장치의 단위계단응답의 상승시간과 주파수 대역사이에는 일정한 관계가 있으며, 오실로스코우프용 증폭기의 응답특성이 正規分布를 갖는 경우는 다음의 관계로 된다 7).8)

$$Bw \cdot Tr = 350 \quad (5)$$

따라서 센서의 단위계단응답의 상승시간  $Tr$  [ns]을 측정하게 되면 대역폭  $Bw$  [MHz]가 결정되므로 高域側遮斷周波數를 구할 수 있다. 이 때 센서응답의 순수상승시간  $Tr$ 는 다음의 관계 식으로부터 구해진다.9)

$$Tr = \sqrt{Tr_3^2 - Tr_2^2 - Tr_1^2} \quad (6)$$

여기서  $Tr_1$  [ns]은 입력전압의 상승시간,  $Tr_2$  [ns]은 오실로스코우프자체의 상승시간,  $Tr_3$  [ns]은 센서의 응답측정치의 상승시간이다.

또한 단위계단응답의 크기가 -3[dB]까지 감소되는 低域側遮斷周波數  $f_L$ 은 관측용 계기의 입력임피던스와 센서의 정전용량  $C_2$ 로부터 다음의 식으로 정해진다.8)

$$f_L = \frac{1}{2\pi R C_2} \quad (7)$$

## 2.2 센서의 설계

용량성 전계센서의 설계할 때에는 특히 센서의 정전용량이 균일하지 않으면 스텝상의 씨-지전압이 인가될 때 센서전극의 電位分布가 불균일하게 되므로 漂流電流가 흐르게 될 가능성이 있기 때문에 접촉면이 균일하여야 된다.

따라서 본 연구에서는 감지전극을 평판형으로 하여 얇은 절연물을 전극사이에 끼우는 구조로 하고, 센서의 정전용량의 균일성을 도모하기 위하여 접촉면의 가공을 高精度로 하였으며, 임피던스의 整合을 고려하여 그림 2에 나타낸 바와 같이 원추형 구조로 설계하였다.

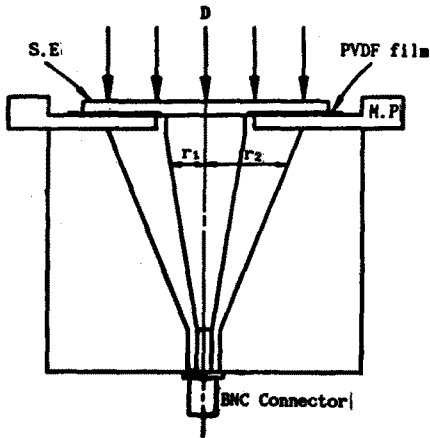
동축선로의 특성임피던스  $Z_0$ 는<sup>6)</sup>

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_s}} \log_{10} \frac{r_2}{r_1} \quad (8)$$

로 표현되며, 공기 또는 기체중에서의  $\epsilon_s$ 는 약 1이므로 센서의 원추부분에 있어서의 특성임피던스를 50 [Ω]으로 하기 위하여  $r_2/r_1 = 2.3$  이 되도록 하였다.

절연물로는 절연내력 및 기계적, 열적 우수하며, 비유전율이 크므로 작은 구조로 충분한 정전용량을 얻기 위하여 폴리불화비닐리덴(PVDF, 두께 22 [μm], 比誘電

률  $\epsilon_0$ : 7.1) 필름을 사용하였으며, 센서의 정전용량이 약 11.1[nF]가 되도록 설계하였다.

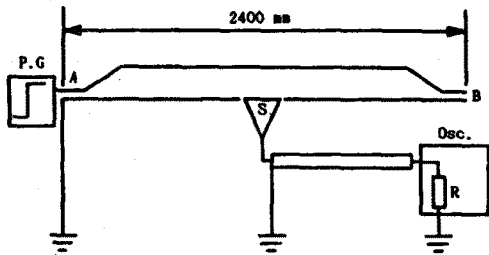


D: Incident electric flux density  
S.E: Sensing electrode M.P: Mounting plate

그림 2. 센서의 단면도  
Fig. 2. Cross-sectional view of the sensor

3. 실험결과 및 검토

제작된 전계센서를 실용기에 설치하여 사용하기 위해서는 주파수 대역의 결정 및 교정실험이 필요하므로 평행판형 전송선로를 이용하여 센서의 단위응답특성 실험을 수행하였다. 계단전압의 전송을 위하여 평행판형 전송선로의 특성임피던스가 50 [Ω]이 되도록 제작하였으며, 교정실험회로는 그림 3과 같다.

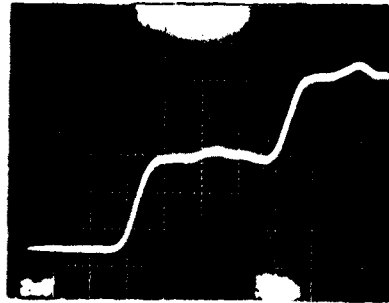


P.G: Pulse generator(Wave Tex.)  
Osc.: Oscilloscope(Tekx. 2232)  
S: Sensor R: Input impedance

그림 3. 전계센서에 대한 특성실험의 회로구성  
Fig. 3. Test configuration for electric field sensor

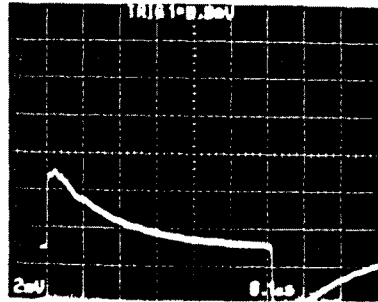
전원으로는 상승시간이 약 5 [ns]이고, 최대전압 20 [V]인 펄스발생기 (Wave Tex계)를 사용하였으며, 입력전압의 측정에는 오실로스코프(Tek.2232, 상승시간 약 4.5 [ns])를 사용하였다. 전송선로의 종단부에

3.34 [M]의 동축케이블을 연결하고 개방시켰을 때의 단위계단응답은 그림 4(a)에 나타내었다.



[2 mV/div, 5 ns/div]

(a) 전송선로의 종단부를 개방시켰을 때 응답의 상승부



[2 mV/div, 100 ns/div]

(b) 전송선로를 50 ohm으로 정합시켰을 때의 전체 응답 파형

그림 4. 계단응답 파형  
Fig. 4. Waveforms of the step response

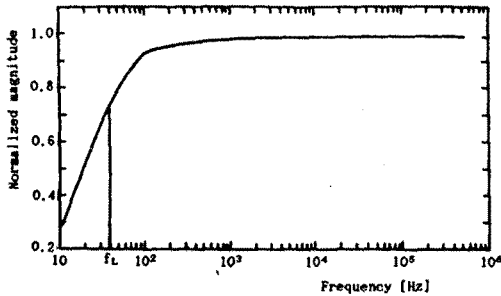
센서의 단위계단응답의 상승시간은 약 7.2 [ns]이므로 식 (6)으로부터 센서응답의 순수상승시간은 약 1.7 [ns]이다. 따라서 고역속 차단주파수는 식 (5)에 의하여 약 200 [MHz]임을 알 수 있다.

전송선로의 종단부가 개방되어 있으므로 입력전압의 반사파가 있음을 확인 할 수 있으며, 이것으로부터 입력펄스의 傳播速度는 약  $2.27 \times 10^8$  [m/sec]가 됨을 알 수 있다.

그림 4(b)는 센서의 정전용량을 측정하기 위하여 전송선로의 종단부에 50 [Ω]의 저항을 연결하고 측정안주液應答의 파형으로 이의 約定數로부터 센서의 정전용량이 산출되며 약 3.6 [nF]이다. 이 측정치는 설계치의 약 1/3으로 적게 나타났으나 이러한 차이는 전극과 절연물사이의 접촉이 이루어지지 않은 부분이 있

며, 이 부분에 空隙이 형성되므로서 기인되어진 것이라고 추측된다. 주위온도 및 압력의 변화에 의한 공극의 변화는 거의 없으므로 센서의 특성 변화는 없을 것으로 예상된다.<sup>10)</sup>

주파수대역의 저역측 한계를 결정하기 위하여 입력전원으로 합수발생기(TRIO AG-203, 5Hz-2MHz)를 사용하여 응답특성을 측정하였다. 주파수가 낮아짐에 따라 측정최로의 감쇠시정수로 출력전압이 감소되므로 500 [Hz] 이상의 주파수에 대한 응답의 평균치에 대하여 규격화시켜 나타낸 결과를 그림 5에 나타내었다. 식 (7)로부터 구한 低域側 遮斷周波數는 약 40 [Hz]이며, 그림 5에서 -3 [dB]에 상당하는 주파수와 거의 일치하고 있다.



fl : Low-frequency cutoff

그림 5. 주파수응답특성

Fig. 5. Frequency response characteristics

센서전극과 절연필름사이의 밀착상태에 따른 센서의 응답특성과 본압비의 변화는 대단히 적었으며, S.A.Boggs와 N.Fujimoto에 의하면 50[Hz]의 교류전압과 상승시간이 0.7[ns]인 펄스전압에 대한 본압비의 차이는 3[%]이하라고 보고되어 있다. 따라서 본 연구에서 제작한 센서의 본압비 오차는 3[%]\*3.6/11.1=1.0[%]이하가 될 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

맥스웰의 電磁方程式을 기초로 하여 急峻性過渡電壓과 시변성 전계속정용 센서에 대한 동작원리와 설계, 고정실험계 구성에 대한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

\* 용량성 전계센서는 전력설비의 내부에서 발생하는 과도과전압과 시변성 전계의 측정이 가능하며, 소형이므로 가스절연개폐장치나 연구용 실험장치에 내장시킬 수 있다.

\*\* 고주파 특성이 우수하고, 高域側 遮斷周波數는 약 200 [MHz]이었으며, 상용주파전압의 측정도 가능하였고, 負荷效果를 억제할 수 있는 고성능의 광대역 고전

압 측정용 센서가 실현되었다.

\*\*\* 센서를 원추형구조로 하여 입사전계의 定在波 발생을 억제시켜 응답도를 향상시켰으며, 본압비 오차를 1[%]이내로 유지할 수 있었다.

#### References

- 1]. 河村 達雄, 李 福 熙 ; " 가스絶緣開閉裝置에 있어서 急峻波 過渡過電壓의 발생과 절연특성 ", 대한전기학회지, Vol. 38, No. 1, pp. 21-30, 1989
- 2]. Bok-Hee Lee, et al : " Particle-Initiated Breakdown Behaviors of SF<sub>6</sub> Gas under the Very fast Transient Overvoltages ", The 2nd Asian Conference on Electrical Discharge ", pp. 67-72, 1989
- 3]. 河村 達雄, 李 福 熙 外 ; " GIS에 있어서 急峻波 サ-シ 試驗裝置と 測定システム " 平成元年 電氣學會全國大會 論文集, Paper No. 1288, 1989
- 4]. J. Meppelik, K. Diederich, K. Fisher and W. Pfaff ; " Very Fast Transients in GIS ", Cigre, Paper WM 114-1, 1988
- 5]. A. Welsch ; " Outcoupling and External Phenomena of Very Fast Transients in GIS ", 6th ISH, New Orleans, Paper No. 49-05, 1989
- 6]. John D. Kraus : Electromagnetics, McGraw Hill book Co., 3rd edtion, 1988, pp. 365-452
- 7]. 李 福 熙, 외 ; " GIS에 있어서 過渡過電壓 측정용 센서 ", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 297 - 300, 1990
- 8]. J. Lalot : " Generation and Measurement of Fast Transient Overvoltages with Special Reference to Disconnecter Operation in GIS ", Cigre, No. 33-86, 1986
- 9]. Edmund K. Miller : Time-Domain Measurements in Electromagnetics, Van Norstand Reihold Co., 1986, pp. 175-290
- 10]. S.A. Boggs and N. Fujimoto : " Techniques and Instrumentation for Measurement of Transients in Gas-Insulated Switchgear ", IEEE Trans. Vol. EI-19, pp. 87-93, 1984