

## 대지전계 측정용 Field Mill 개발에 관한 연구

천 상 규<sup>1)</sup>, 송 재 용<sup>1)</sup>, 길 경 석<sup>2)</sup>

### A Study on the Development of a Rotation-type Field Mill for Measuring Electric Field on the Ground Level

S. G. Cheon , J. Y. Song , G. S. Kil

#### Abstract

This paper describes a rotation-type field mill to measure the electric field intensity caused by thunderclouds on the ground level. The field mill developed is consisted of two isolated electrode vanes, a grounded stator and a rotor.

To develop a high sensitive field mill, the principles and design rules of a rotation-type field mill are studied. Also, two types of calibration system, such as a cylindrical guard electrodes and a parallel-plate electrodes, are proposed to determine the sensitivity and frequency bandwidth of the field mill.

From the calibration experiment, the frequency bandwidth and the sensitivity of the field mill are DC ~ 200 [Hz] and 0.267 [mV/V/m], respectively. Therefore, it can measure the electric field intensity from 73 [V/m] to 18.7 [kV/m].

#### 1. 서 론

대기 중에 있어서 시시각각 변화하는 전계의 측정은 매우 어렵다. 지표면에서의 대기전계 측정에 관한 연구는 미국의 Kennedy Space Center와 일본 등지에서 활발히 진행되고 있고, 상공에서의 전계 측정은 주로 NASA에서 이루어지고 있다.

대지에서의 전계를 측정하는 방법으로는 크게 다음의 세 가지 방식이 이용된다. 첫 번째는 코로나 침을 이용하는 방식으로서, 이것은 강한 전계하에 침단이 있을 경우, 그 침단에 코로나 전류가 발생한다는 것을 이용하는 것이다. 침단이 임의의 임계값을 초과하는 전계에 노출되어 침단과 주변 공간 사이에 전위차가 발생하면, 침단에서는 코로나 방전이 일어나게 된다. 이 때 발생하는 방전 전류는 침단의 곡률 반경과 주변 전계의 세기에 의해 결정되므로, 침단에 흐르는 전류 ( $I$ )와 전계 ( $E$ ) 사이의 관계식은 다음과 같이 표현된다<sup>[1]</sup>.

$$I = a(E^2 - E_0^2) [A] \quad (1)$$

1) 한국해양대학교 대학원

2) 한국해양대학교 전기시스템공학과

여기서,  $a$ 는 상수로서  $10^{-13} \sim 10^{-16} [A \cdot m^2/V^2]$ 이고,  $E_0$ 는 코로나 개시시의 전계 세기로서  $E \geq E_0$ 이다.

코로나 침을 이용하여 대기전계를 측정하는 방법은 간단하고, 장비 또한 경량이면서 침단의 절연을 높이지 않아도 된다는 장점이 있어 수면상에 존재하는 전계의 측정에도 널리 활용되고 있다. 그러나, 이 방법은 1~2 [kV/m] 이하의 전계는 측정할 수 없고, 침단 부식의 우려가 있다는 등의 주요한 단점을 갖고 있으므로 저전계 영역이나 다습한 기후에서의 전계 측정에는 부적합하다.

두 번째 방식으로는 용량성 평판 안테나를 이용하는 것이다. 평판 안테나는 저역 안테나와 고역 안테나로 분류할 수 있으며, 저역 안테나의 기록 가능한 주파수 대역은 0.1~수 [kHz]이고, 고역 안테나는 수 백 [Hz]~수 [MHz] 이하의 주파수 대역을 갖는다<sup>[1]</sup>. 평판 안테나를 이용하는 방식은 평판에 유기되는 전하를 측정함으로써 간단하게 전계의 세기를 구할 수 있지만, 계측 장비의 부피가 크고, 설치상의 어려움이 있으며 정전계를 측정할 수 없다는 단점을 갖고 있다<sup>[2]</sup>.

세 번째 방식으로는 회전형 필드 밀을 이용하여 측정하는 것으로서, 이 방식은 코로나 침이나 평판 안테나가 가진 단점을 보완할 수 있으므로 정전계 영역을 포함한 저전계 영역의 전계 측정이 가능하고 휴대가 가능하며, 활용 분야 또한 광범위하다<sup>[3]~[6]</sup>.

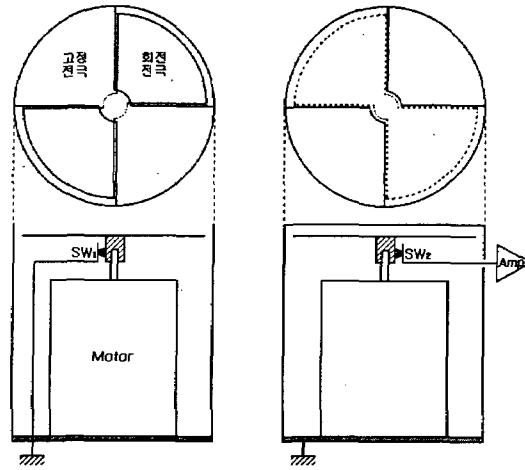
따라서 본 연구에서는 회전형 필드 밀을 이용한 대지 전계 측정장치를 설계·제작하였으며, 시제작된 측정장치는 원통형 가드전극계 및 평판형 전극계에 의한 교정 실험으로부터 응답특성이 양호함을 입증하고자 한다.

## 2. 회전형 필드 밀의 원리

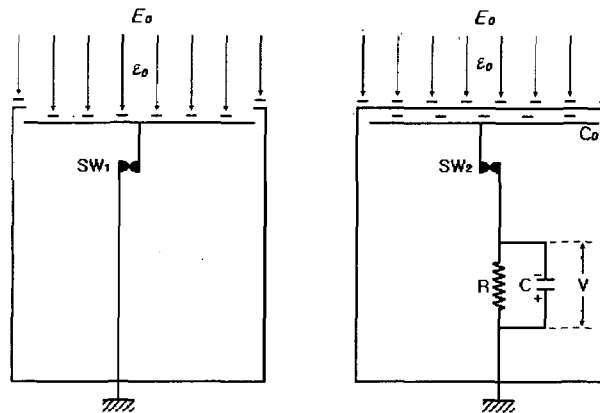
회전형 필드 밀을 이용한 전계 측정 장치는 정전계는 물론 아주 느린 전계 변화를 측정할 수 있고 감도가 우수하기 때문에 지상에서의 대지전계 뿐 만 아니라, 기구나 비행선상에서의 대기전계 측정이 가능하다. 필드 밀은 원통형(Cylindrical type)과 평면-셔터형(Planar-shutter type)의 두 가지 형태가 있으며, 원통형은 대기전계 측정에 주로 사용되고, 평면-셔터형은 지표면에서의 대지전계를 측정하는데 사용된다<sup>[7]</sup>.

본 연구에서는 지표면에서의 대지전계를 측정하기 위한 평면-셔터형 필드 밀을 적용하였으며, 그림 1에 기하학적 구조를 나타내었다.

필드 밀은 두 개의 부채꼴 모양의 날개를 가진 회전전극과 고정전극으로 구성되고, 두 전극간은 서로 절연상태로 되어 있다. 전계 검출의 원리로는 회전전극이 중심축을 따라 수평으로 회전하면서 고정전극에 의해 노출과 차폐를 반복하는데, 그림 (a)와 같이 회전전극이 전계에 완전히 노출되는 순간에는 전극이 접지되고, 이후 90° 회전하여 회전전극이 완전히 차폐되어질 때 증폭기에 연결되어 전계 신호가 검출된다. 이러한 동작원리를 그림으로 도해하면 그림 2와 같다.



(a) (b)  
Fig. 1 Construction of a field mill



(a) (b)  
Fig. 2 Principle of the field mill

그림 2에서 회전전극이 전계에 대해 노출되는 면적을  $S$ 라 하면, 회전전극이 완전히 외부 전계에 노출되어질 때, 전극 표면에 대전되는 전하  $Q_0$ 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$Q_0 = \epsilon_0 E_0 S [C] \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon_0$ 는 진공중(공기중) 유전율,  $E_0$ 는 회전전극 표면에 입사되는 전계의 세기이다.

접지면과 연결이 끊긴 후 대전된 전하  $Q_0$ 는 회전전극 표면에 포획되고, 회전전극의 이동에 의해 완전히 차폐된 상태에서는  $C_0$ (회전전극과 고정전극 사이의 정전용량)에 운반됨과 동시에 스위치  $SW_2$ 에 의해 증폭기의 입력에 연결된다. 그림 3은  $C_0$ 에 충전된 전하가 증폭기로 전달되는 과정을 나타낸 것으로서,  $R$ 과  $C$ 는 각각 필드 밑에서 증폭기로의 신호를 전송하는 동축케이블의 누설저항과 정전용량이다. 이 때 증폭기의 입력전위  $V_0$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$V_0 = \frac{Q_0}{C_0 + C} = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \text{ [ V ]} \quad (3)$$

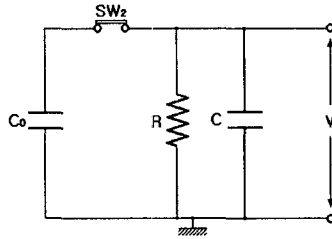


Fig. 3 Transfer process of the trapped charge

연속적인 동작으로 회전전극이  $90^\circ$  회전하게 되면  $SW_2$ 가 열리고, 증폭기의 입력 신호는 식 (4)와 같이 감소하게 된다.

$$V_1 = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} e^{-t_1/\tau} \text{ [ V ]} \quad (4)$$

$$\text{단, } \tau = RC$$

여기서,  $t_1$ 은  $C$ 에 첫 번째 충전이 된 후 감쇠되는 시간이다.

회전전극은 다시 외부 전계에 노출되고 대전된 전하를 포획한 다음 증폭기의 입력 회로에 연결되어지는데, 이 때 콘덴서  $C$ 에서의 충전하량은 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_0 E_0 S + C V_1 = \epsilon_0 E_0 S + \frac{C \epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} e^{-T/\tau} \text{ [ C ]} \quad (5)$$

여기서,  $T$ 는 사용된 전동기의 1/2회전 주기이다.  $SW_2$ 가 열려 있을 때,  $C$ 에서의 전하량은 이 값의  $C/(C_0 + C)$ 배로 주어진다. 따라서, 두 번째 충전한 후 증폭기의 입력전위는

$$V_2 = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \left( 1 + \frac{C}{C_0 + C} e^{-T/\tau} \right) e^{-t_2/\tau} \text{ [ V ]} \quad (6)$$

가 되므로  $n$  번째 충전 후의 전위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \left( \sum_{n=1}^n r^{n-1} \right) e^{-t_n/\tau} \text{ [ V ]} \quad (7)$$

$$\text{단, } r \equiv \frac{C}{C_0 + C} e^{-T/\tau}$$

여기서,  $|r| < 1$ 의 관계는 항상 성립하므로 식 (7)의 급수는 다음과 같이 수렴되어진다.

$$\sum_{n=1}^n r^{n-1} = \frac{1-r^n}{1-r} \quad (8)$$

$C$ 와  $R$ 의 값을  $\tau \gg T$ 가 되도록 선택한다면,  $e^{-T/\tau} \approx 1$ 의 관계가 성립하므로,  $n \rightarrow \infty$ 로 될 때

$$V_\infty = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0} e^{-t_\infty/\tau} \text{ [ V ]} \quad (9)$$

와 같이 되고, 주기  $T$  동안 지수항은 1이 되기 때문에, 증폭기에 걸리는 입력 전압은 결국 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0} \text{ [ V ]} \quad (10)$$

이상의 결과와 같이 필드 밀을 통해 얻어진 신호는 회전전극의 총면적에 비례하고 정전용량  $C_0$ 에 반비례함을 알 수 있다.

### 3. 대기전계 측정장치

필드 밀을 이용한 전계 측정은 일정한 면적의 도체 표면에 유기되는 전하량을 측정하여 입사되는 전계를 측정하는 방법의 일종으로서, 인위적으로 입사 전계를 변화시킨다는 주요한 특징을 갖고 있다. 입사되는 전계를 변화시키기 위해서는 도체 표면을 노출/차폐시키기 위한 기계적인 장치가 필요하기 때문에 입력 전압이 DC 5.6[V]인 1,800[rpm]의 직류 전동기를 이용하여 그림 4와 같은 필드 밀을 제작하였다. 그림 4에서 (a)는 필드 밀의 개략적인 구성을 (b)는 실험에 사용된 필드 밀의 사진을 나타내었다.

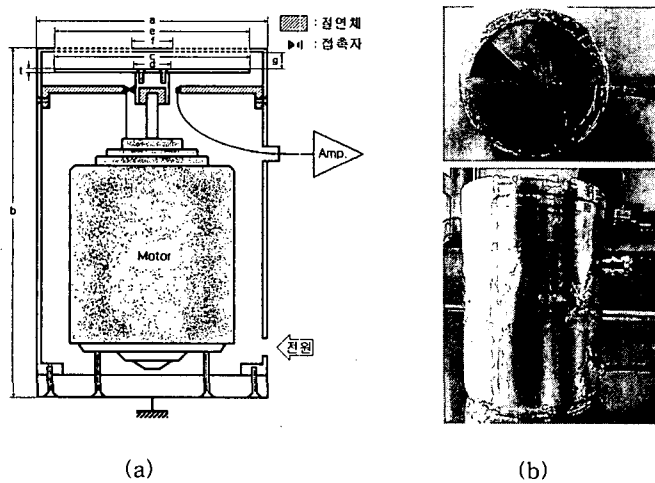


Fig. 4 Electric field measurement system utilizing the field mill

회전전극과 고정전극은 도전성과 가공성이 우수한 알루미늄판을 사용하였으며, 외형적인 사양은 표 1과 같다.

Table 1 Specifications of the field mill

구 분	기호	치 수 [mm]
외 함 직 경	a	110
외 함 높 이	b	190
회전전극 직경(외부)	c	94
" (내부)	d	24
고정전극 직경(외부)	e	92
" (내부)	f	25
전 극 간 겹	g	3.5
전 극 두 께	t	1.5

이때 얻어지는 필드 밀의 전기적 파라미터는 다음과 같다.

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d} = 7.84 \text{ [pF]}$$

$$T = 1/60 = 0.0167 \text{ [sec]}$$

$$S = 3.1 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$C = 910 \text{ [pF]} \text{ (길이 10[m]의 동축 케이블이 사용될 때)}$$

$$R = 5 \times 10^9 \text{ [\Omega]}$$

$$\tau = RC = 4.55 \text{ [sec]}$$

$$V = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0} = 0.350 \text{ [V]} \text{ (} E_0 \text{는 } 100 \text{ [V/m]일 때)}$$

$$I = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{T} = 1.64 \times 10^{-10} \text{ [A]}$$

$$Z = \frac{T}{C_0} = 2.13 \times 10^9 \text{ [\Omega]}$$

여기서  $\tau$ 는 신호입력회로의 시정수로서  $\tau \gg T$ 의 관계가 성립되고, 필드 밀은 고입력 임피던스를 가지므로 임피던스 변환기가 필요로 하게된다.

필드 밀로부터 얻어진 신호는 동축케이블(RG-58A/U)을 통해 임피던스 변환기로 전송되며, 증폭기, A/D 변환기를 거쳐 디지털 표시장치에 측정된 전계의 값을 표시한다. 필드 밀을 이용한 대지 전계 측정장치는 그림 5와 같이 구성되며, 외부의 불필요한 전자파 잡음과 오차를 최소화하기 위하여 전극부를 제외한 모든 부분은 차폐 구조로 설계하였다.

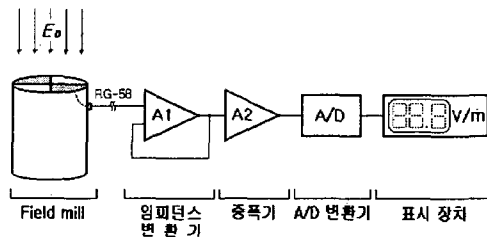


Fig. 5 Configuration of the electric field measuring system

그림 5의 구성에서 필드 밀이 가진 임피던스는 대단히 높기 때문에 별도의 임피던스 변환 회로를 구성하였다. 그림 6에는 임피던스 변환기 및 증폭회로의 구성을 나타낸다.

본 연구에서는 임피던스 변환기로 입력 임피던스가  $1.5 \times 10^{12} \text{ [\Omega]}$  정도인 FET 입력을 가지는 연산증폭기(CA3130)를 사용하였고, 임피던스 변환기 출력의 미소 전위를 증폭하기 위하여 고감도 연산증폭기(op-77)를 사용하였으며, 입력되는 전계 신호가 대단히 미약하기 때문에 40 [dB] 정도의 이득을 얻기 위하여 증폭회로를 2단으로 구성하였다.

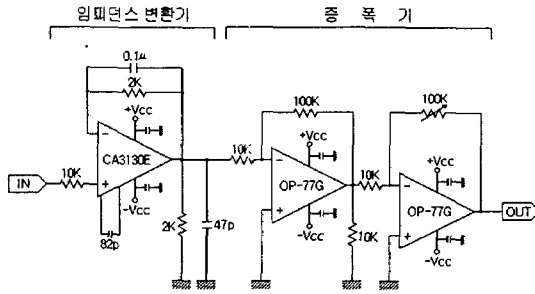


Fig. 6 Circuit for the impedance changer and amplifier

#### 4. 교정장치 및 방법

##### 4.1 교정장치의 설계 및 제작

회전형 필드 밀을 포함한 대지전계 측정장치의 측정감도와 주파수 대역을 파악하기 위하여 교정용 실험장치를 구성하였다. 교정실험장치는 교정용 전극계와 외부 노이즈에 의한 전계의 왜곡이 없는 평등전계를 얻을 수 있도록 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계로 구성하여 특성을 비교하였다<sup>[8],[9]</sup>.

원통형 가드전극계의 교정용 실험장치는 그림 7(a)와 같이 외부에너지에 의한 표류 전계를 가드 전극으로 차폐시키고, 고정밀도의 기계적 안정도를 얻기 위하여 높이 50 [mm]인 원주형 가드 전극(Cylindrical guard electrode)을 사용하여 평등전계를 형성시켰다. 이 구성은 센서의 감지 전극에서 99.9 [%] 이상의 평등전계를 만들고자 설계하였으며, 이에 대한 계산은 다음과 같다.

가드전극계가 그림 7(a)와 같이 구성되어 있고, 전극  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ 의 전위가 각각  $-1/2 \Delta V$ ,  $1/2 \Delta V$ ,  $3/2 \Delta V$ 이고  $M$ ,  $N$ 점의 전위가 각각  $0$ ,  $\Delta V$ 라 하자.

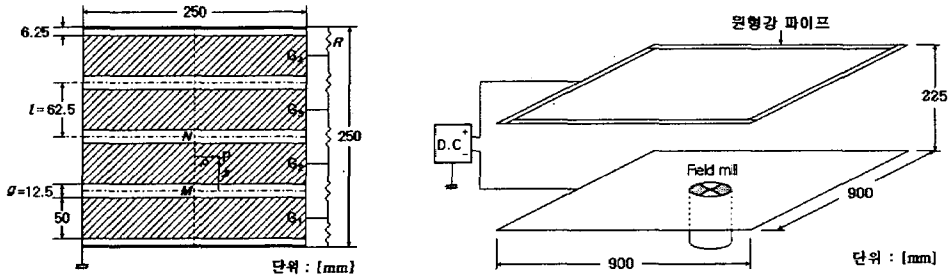
전극간 갭의 중앙인 평면의 중심으로부터  $z$ , 수평축으로부터  $\rho$ 만큼 떨어진 점 P의 전위는 다음과 같이 표현된다<sup>[10],[11]</sup>.

$$\phi_0 = \left[ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi mg/l)}{\pi mg/l} \frac{\sin(2\pi mz/l)}{2\pi mz/l} \frac{J_0(2\pi m\rho/l)}{J_0(2\pi mR/l)} \right] \frac{z}{l} \Delta V \quad (13)$$

여기서,  $g$ 는 갭의 길이,  $l$ 은 인접전극의 중심간 거리,  $R$ 은 센서의 반경,  $J_0$ 는 영차 BESSEL함수,  $m$ 은 정수의 우수이다<sup>[12]</sup>.

평등전계 영역을 넓히기 위해  $l = 62.5$  [mm],  $g = 12.5$  [mm],  $R = 125$  [mm]로 하였으며,  $m = 2$ 로 하고 그 이상의 값을 무시하여 계산한 전위값  $\phi_0 = \Delta V z/l$ 인 이상으로 나눈 결과, 센서 감지면적에서 전계 변화는 최대 0.06 [%] 이하로 된다.





(a) Cylindrical guard electrode system      (b) Parallel-plate electrode system  
 Fig. 7 Schematic diagrams of the experimental apparatus for calibration

가드 전극의 재료로는 폭 50 [mm]의 동테이프를 사용하였으며, 전극 사이에 흐르는 전류의 양을 줄이기 위해 각 전극간에 10 [kΩ]의 저항을 연결하여 총 저항값을 50 [kΩ]으로 하였다. 가드전극계의 높이는 250 [mm]로 하여 25 [V]의 입력 전원이 인가되었을 때 생기는 평등전계의 세기가 100 [V/m]가 되도록 설계하였다. 특히, 교정실험에 있어서는 원통형 가드 전극계를 접지판에 설치하고 상부에 접지된 차폐전극을 설치함으로써 외부 잡음 즉, 상용주파수 60 [Hz] 교류전압에 의해 입사되는 외부 전계의 영향을 최소화할 수 있는 구조로 하였다.

평행평판 전극계는 그림 7(b)와 같이 두 개의 사각 평판을 이용하여 전계센서의 입사면에서 평등전계가 형성되도록 구성하였다<sup>[13],[14]</sup>. 정사각형의 평행평판 전극을 대지에 평행하게 두는 배치는 전극의 가장자리에서 높은 전계를 발생시키지만, 접지된 전극으로부터 높이  $H$ 와 한 변의 길이  $L$ 과의 비가 작으면 중심 부근에서는 균등한 전계를 얻을 수 있다. 따라서, 교정용 전극의 배치는 900×900 [mm]의 정사각형 평판을 225 [mm] 간격을 두고 평행하게 설치하고, 평판 전극 주위에 원형강 파이프를 부착하여 가장자리 효과가 최소화되도록 하였다.  $H/L$ 의 값에 따른 중심선상에서의 전계 변화( $E/E_0$ )의 상관 관계를 살펴보면<sup>[14]</sup>, 본 연구에서 제작된 평행평판 전극계 중심에서의 전계 변화는 0.3 [%] 이하이다.

#### 4.2 교정방법

시제작한 대지전계 측정장치의 주파수 대역과 응답감도를 측정하기 위하여 최대출력전압이 15 [V]인 함수발생기(FG-2002C, LG)와 직류고전압 발생장치(MHV12, 0~1.5 [kV], Bellnix)를 사용하였으며, 본 연구에 사용된 교정실험계의 개략도를 그림 8에 나타내었다.

대지전계 측정장치의 주파수 대역은 원통형 가드전극계에 직류 및 함수발생기로부터 정현파 신호의 주파수를 가변하면서 측정하였으며, 응답감도는 원통형 가드전극계 및 평행평판 전극계에서 각각 측정하였다.

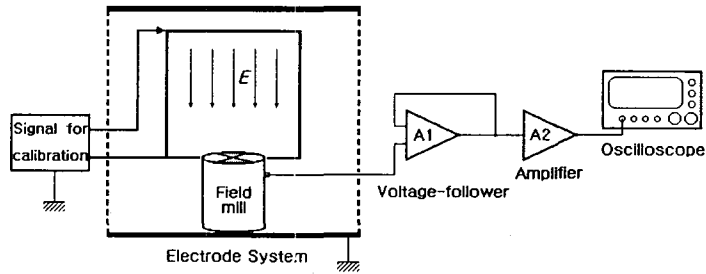


Fig. 8 Schematic diagram of the experimental apparatus for calibration

### 5. 실험결과

대지전계 측정장치의 주파수 대역은 원통형 가드전극계의 교정용 전극에 인가되는 전압을 15 [V]로 유지하여 회전형 필드 밀의 감지전극 표면에 형성되는 전계의 세기가 60 [V/m]가 되도록 설정한 후, 주파수를 가변하면서 이에 대한 대지전계 측정장치의 출력전압을 비교하여 측정하였다.

그림 10은 대지전계 측정장치의 주파수 응답특성을 나타낸 것으로 -3 [dB]의 상한 주파수는 약 200 [Hz]로 평가되었다. 따라서 본 측정장치는 35 [Hz] 이하의 주파수를 갖는 전계의 입사에 대해 감쇠 없는 정확한 값을 나타내지만 60 [Hz]의 교류전계에서는 6 [%] 감소한 값을 나타낼 것이다.

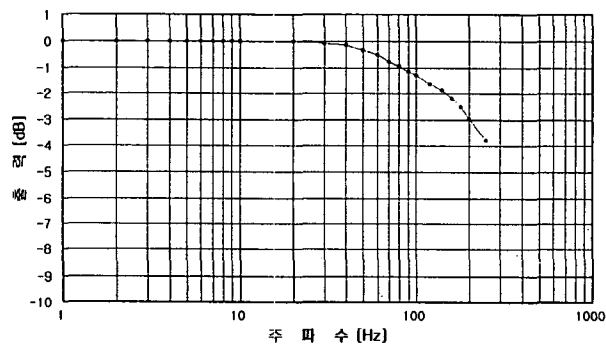


Fig. 10 Frequency response characteristics of the electric field measuring system

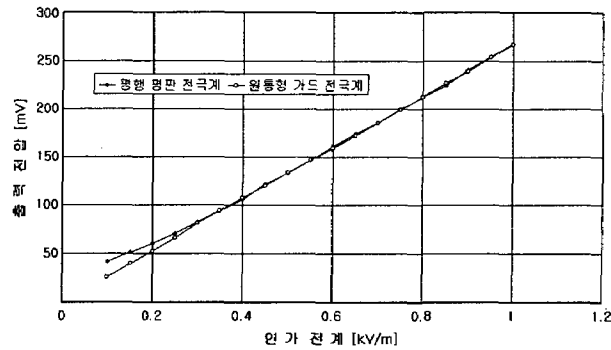


Fig. 11 Response characteristics of the electric field measuring system to change of the applied electric field

그림 11은 대지전계 측정장치의 응답특성으로, 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계에 직류전압을 인가하여 형성된 전계의 세기와 측정장치의 출력전압을 나타낸 것이다. 회전형 필드 밀에 입사되는 전계의 세기를 100 [V/m]에서 1 [kV/m]까지 변화시켰으며, 이에 대한 대지전계 측정장치의 출력전압은 그림 11과 같이 선형적인 특성을 나타내었다. 300 [V/m] 이하의 전계에서는 두 교정장치에 의한 결과가 약간의 오차를 나타내는데, 이것은 평행평판 전극계의 경우 외부 입사전계에 영향을 받기 때문이다.

실험결과로부터 본 대지전계 측정장치의 응답감도는 100 [V/m]의 전계입력에서 출력전압이 26.7 [mV]이므로 0.267 [mV/V/m]임을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 대지전계의 변화를 측정하기 위하여 필드 밀의 원리를 해석하고, 이를 이용한 대지전계 측정장치를 설계·제작하였다. 제작한 대지전계 측정장치의 감도특성을 파악하기 위한 교정장치로 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계의 두 가지 방법을 이용하였으며 그 결과, 회전형 필드 밀을 이용함으로써 평판 안테나로써 측정할 수 없는 정전계 영역의 전계 측정이 가능하다는 것과 본 측정장치로 측정 가능한 주파수 대역이 DC~200 [Hz]임을 확인하였다. 또한, 본 연구에서 설계·제작한 필드 밀의 최대감도가 0.267 [mV/V/m]로서 인가전계에 비례하는 선형적인 응답을 나타내었으므로, 대지전계 측정장치는 최소 73 [V/m]에서 최대 18.7 [kV/m]까지의 전계를 측정할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 北條 準一 外, "大氣電界の計測法", 昭和59年電氣四學會連合大會, pp. 25~28, 1984.
- [2] M. A. Uman, "Lightning", *Dover Publications Inc.*, New York, pp. 1~113, 1982.
- [3] S. G. Gathman, "A Field mill for Tethered Balloons", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 43, No. 12, pp. 1751~1754, 1972.
- [4] S. G. Gathman, "Improved Field-meter for Electrostatic Measurements", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 36, No. 10, pp. 1490~1493, 1965.
- [5] T. P. Sheahan, "Model of Response of An Electric Field mill Operating During Suborbital Flight", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 45, No. 2, pp. 171~177, 1974.
- [6] R. C. Waddel, "An Electric Field Meter for Use on Airplanes", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 19, No. 1, pp. 31~35, 1948.
- [7] J. N. Chubb, "Two New Designs of 'Field mill' type Fieldmeter not Requiring Earthing of Rotating Chopper", *IEEE Trans. Ins. Appl.*, Vol. 26, No. 6, pp. 1178~1181, 1990.
- [8] J. N. Chubb, "The Calibration of Electrostatic Fieldmeters and the Interpretation of their Observations", *Electrostatics '87, Inst. Phys. Conf. Series*, No. 85, pp. 261~266, 1987.
- [9] 길경석, 송재용, 김일권, "휴대용 극저주파 전장측정기 개발", 한국센서학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 120~126, 2000.
- [10] 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.
- [11] A. Gilardini, "Low Energy Electron Collision in Gases", *John Wiley and Sons, Inc.*, pp. 164~166, 1972.
- [12] E. Kreyszig, "Advanced Engineering Mathematics", *4th Edition, Wiley*, pp. 176~179, 1982.
- [13] T. Takuma, T. Kawamoto, Y. Sunaga, "Analysis of Calibration Arrangements for AC Field Strength Meters", *IEEE Trans.*, Vol. PAS-104, No. 2, pp. 489~495, 1985.
- [14] 宅間 外, "高電壓大電流工學", 電氣學會大學講座, 電氣學會, pp. 158~162, 1988.