

## 대지전계 측정을 위한 필드밀의 설계 및 제작

(Design and Fabrication of a Field Mill for Ground-Level Electric Field Measurement)

길경석\* · 송재용 · 김일권 · 권장우 · 안창환 · 이영근

(Gyung-Suk Kil · Jae-Yong Song · Il-Kwon Kim · Jang-Woo Kwon ·  
Chang-Hwan-Ahn · Young-Keun Lee)

### 요 약

본 논문에서는 뇌경보시스템에 적용하기 위한 센서로 대지전계의 극성과 크기의 측정이 가능한 필드밀에 대하여 연구하였다. 회전날개를 갖는 평면 셔터형 필드밀을 설계·제작하였으며, 필드밀의 교정은 대칭적인 구조의 원형 평판전극을 수직으로 배열하고 이때 얻어지는 평등전계 내에서 수행하였다. 교정실험에서 필드밀의 감도를 0.5[V/kV/m]로 조정하였으며, 측정 가능한 대지전계의 범위는 200[V/m]~20[kV/m]가 된다. 교정실험 후, 건물 옥상에 필드밀을 설치하고, 뇌운에 의한 대지전계의 변화를 관측하였다. 2006년 7월 1일부터 7월 15일의 기간 중, 뇌운의 생성과 소멸, 이동에 따라 대지전계의 크기는 +2[kV/m]~-6[kV/m]의 범위에서 기록되었다. 적용실험결과로부터 제안한 필드밀은 직류 전계 측정에 충분한 성능이 있음을 확인하였다.

### Abstract

A field mill capable of measuring the magnitude and polarity of electric fields at the ground level was studied to apply to a lightning warning system as a sensor. We designed and fabricated a planar-shutter type field mill with a rotating-vanes. A calibration of the field mill was performed in a vertically symmetrical arrangement which consists of two equal size parallel round plates to form a homogeneous electrical fields. The sensitivity of the field mill was adjusted at 0.5[V/kV/m], and this covers a ranges from 200[V/m] to 20[kV/m]. After the calibration experiment, the field mill was installed on the roof of a building to measure the changes of electric field intensity caused by thunderclouds. During the period from July 1, 2006 to July 15, 2006, the electric field intensity was recorded a ranges of +2[kV/m]~-6[kV/m] depending on generation, extinction and movement of thunderclouds. From the actual test on the ground, it is confirmed that the field mill has a good performance necessary for the measurement of DC electric fields.

Key Words : Field Mill, Electric Fields, Lightning Warning System, Planar-Shutter Type, Thunderclouds

\* 주저자 : 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수  
Tel : 051-410-4414, Fax : 051-403-1127

E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

접수일자 : 2006년 8월 2일

1차심사 : 2006년 8월 7일, 2차심사 : 2006년 9월 15일

심사완료 : 2006년 10월 20일

### 1. 서 론

자연현상에서 낙뢰는 지상의 전력설비와 건축물, 인명 등에 많은 인적 물적 피해를 발생시킨다. 최근

## 2. 이 론

### 2.1 뇌운에 의한 대지전계의 변화

뇌방전은 전하를 가진 뇌운에 의해서 발생되며, 뇌운 중에서도 특히 상층의 대기와 하층의 대기가 불안정한 층으로 구성된 적란운(積亂雲)에 의한 것이 대부분이다. 뇌운의 크기는 작게는 수 [km]에서 크게는 약 20[km]에 이르기도 한다[9]. 또한 뇌방전은 눈보라, 모래폭풍, 화산 폭발시 구름 위에서도 발생하며, 맑은 날씨에서도 발생하는 경우가 있다. 그림 1은 뇌운의 전형적인 모델을 보여준다. 뇌운과 대지사이의 방전은 뇌운의 양(+)-전하와 음(-)전하가 중성으로 되려는 일련의 과정으로써 플래시(Flash)라고 하며, 지속 시간은 대체로 0.01~2[s] 정도이다 [10-11].

에는 기상 이변으로 갑작스런 집중호우나 낙뢰로 인해 과거보다도 문명화된 현대 산업사회에서 더 많은 손실이 발생하고 있다. 지난 수 십 년간 낙뢰로부터 지상은 물론 항공기와 선박에까지도 많은 피해가 발생하였으며, 여러 가지 대책기술들이 연구되어 왔다 [1-4].

그 중에서도 지상에서 대지전계의 변화를 측정하는 기술은 뇌운의 활동과 이동경로, 낙뢰의 발생을 예지할 수 있게 해줌으로써 우주선 발사시 기상조건의 관측, 지상 주요 건축물과 전력설비에서의 안전 대책, 골프장과 운동장에서 활동의 안전성 확보 등 다양한 분야에서 기상관측과 낙뢰에 의한 피해방지 대책의 수단으로 적용되고 있다[5-6].

뇌운에 의한 대지전계는 뇌운의 구조와 활동 특성 상 수 백 [ms] 이상 매우 느리게 변화되므로, 이들 전계의 세기는 시정수가 길어 정전계 측정이 가능한 침단 코로나 전극과 필드밀(Electric Field Mill, EFM)과 같은 센서들이 사용되어 왔다[7-8].

국내에는 현재 600여대의 뇌운경보기가 설치되어 있으며, 대부분 침단 코로나 방식으로 전량 수입에 의존한다. 침단 코로나 방식은 저가격으로 실현이 가능하지만 1~2[kV/m] 이상의 전계이상에서만 코로나 전류가 흘러 선형적인 대지전계의 측정이 불가능하며, 부식 등으로 경년 특성이 급변하고 우천시는 빗방울에 의해 정확한 관측이 불가능한 단점이 있다.

이에 비해 필드밀은 구조가 복잡하고 고가격이지만, 수 백 [V/m]의 낮은 전계부터 100[kV/m]에 이르는 정전계를 선형적으로 측정이 가능하고, 설치환경에서의 특성변화가 거의 없기 때문에 뇌운에 의한 대지전계의 측정은 물론, 직류송전선로에서 대지전계의 측정에도 광범위하게 활용될 수 있다.

본 논문에서는 뇌운이나 직류송전계통에서 대지전계의 측정에 활용할 수 있는 필드밀에 대한 이론적 검토와 시제작품을 개발하였다. 교정 실험을 통해 시제작 필드밀의 감도를 분석하고, 건물 옥상에 설치하여 뇌운에 의한 대지전계의 변화를 측정한 결과, 시제작 필드밀은 대지전계를 분석하는데, 충분한 특성이 있음을 확인하였다.

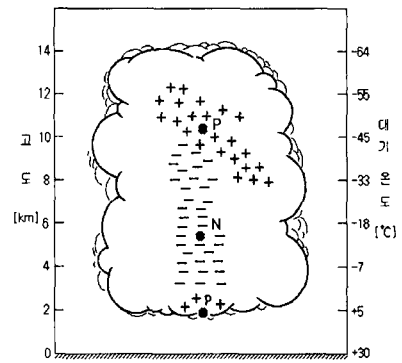


그림 1. 뇌운의 모델  
Fig. 1. Typical thundercloud mode

먼저 서서히 이동하거나 정지상태의 뇌운의 전하 분포에 의해 결정되는 전계의 세기에 대하여 살펴보면, 대기중에서 양(+)-의 점전하(point charge)로부터 거리  $r$ 만큼 떨어진 곳에서의 전계의 세기  $\bar{E}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다[10].

$$\bar{E} = \frac{Q \bar{a}_r}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad [\text{V/m}] \quad (1)$$

여기서  $\bar{a}_r$ 은 점전하로부터 거리  $r$ 의 방향으로의

## 대지전계 측정을 위한 필드밀의 설계 및 제작

단위 벡터이고,  $\epsilon_0$ 는 진공중의 유전율로  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$ 이다. 만약 전계의 발생원이 음(-)의 점전하라면, 전계는 점전하를 향하는 방향으로 생성될 것이고, 식 (1)은 음(-)의 부호를 가진 값으로 될 것이다. 즉 전계 벡터가 대지로 향하는 방향이면 점전하는 양(+),의 점전하이므로, 반대로 대지로부터 나가는 방향이면 음(-)의 점전하라는 것이다. 이 개념은 뇌운 전하에 의한 전계를 해석함에 있어 유용하게 이용될 것이다.

대지면을 평행한 도전성 평판으로 간주하고, 뇌운 중심의 전하를 점전하로 간주하여 양(+), 음(-)전하가 서로 평판에 대해 대칭적으로 배열되어 있는 것으로 함으로써 전계의 세기를 계산할 수 있다. 도전성 평판으로부터 높이  $H$ 에 위치한 점전하  $+Q$ 에 의해 발생하는 전계의 세기를 구하기 위해 전기영상법을 적용한다. 그림 2에 보인 것과 같이 음(-)의 영상 전하  $-Q$ 를 평판 아래 높이  $H$ 에 놓고 평판상에 유기되는 전계의 세기를 구할 수 있다. 점전하로부터 높이  $H$ , 거리  $D$ 만큼 떨어진 평판상 임의의 점에서 전계의 세기는 다음과 같다.

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)} \quad [\text{V/m}] \quad (2)$$

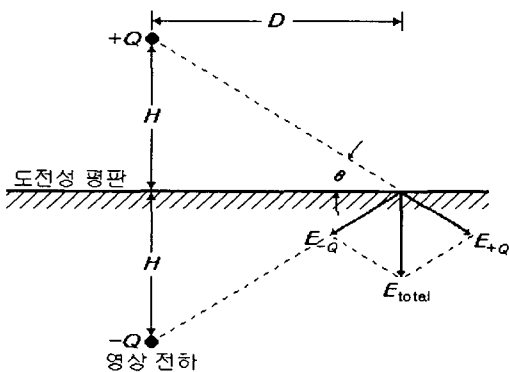


그림 2. 전계 계산을 위한 다이어그램  
Fig. 2. Diagram for calculation of the electric field

각각의 전하에 의한 전계 벡터는 서로 다른 방향으로 형성되므로, 수직 전계는 벡터의 합으로 얻어진다. 전계는 평판에 평행한 성분과 수직 성분으로

분해될 수 있다. 수평 성분의 전계는 크기는 같고 방향이 반대이므로 서로 상쇄되어 도전성 평판에서 수평 전계는 존재하지 않는다. 즉 임의의 도전성 평판에서는 항상 표면에 수직인 전계만이 존재하고, 총 전계의 세기는 두 수직 성분의 합으로 다음과 같이 표현된다. 이 전계는 평판에 수직 방향이고 정(+),의 값이다.

$$E_{\text{total}} = \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)^{3/2}} \quad [\text{V/m}] \quad (3)$$

위에서 설명한 바와 같이 뇌운은 근본적으로 수직 전기 쌍극자인데, 상부에 양(+),전하를 가진 구조이므로 거리  $D$ 의 함수로 취급하여 뇌운 접근에 따른 대지전계 변화를 측정할 수 있다. 구름에서 대지까지의 고도가  $H_N$ 이고, 전하량이  $Q_N$  [C]인 음(-)전하의 방전이 발생하면, 거리  $D$ 의 대지에서 측정되는 정전계는 식 (3)으로부터

$$E_{NG} = -\frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_N H_N}{(H_N^2 + D^2)^{3/2}} \quad [\text{V/m}] \quad (4)$$

가 되고,  $D$ 의 모든 값에 대하여 부(-)의 값이다. 또한 구름에서 대지까지의 고도가  $H_P$ 이고,  $Q_P$  [C]의 전하량을 가지는 양(+),전하에 의한 방전이 발생할 때,  $D$ 의 거리에서 측정되는 정전계의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,  $D$ 의 모든 값에 대하여 양(+),의 값을 갖는다.

$$E_{PG} = +\frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_P H_P}{(H_P^2 + D^2)^{3/2}} \quad [\text{V/m}] \quad (5)$$

이와 같이 뇌운에 의한 대지전계의 변화는 구름내의 전하분포와 이동에 대한 정보를 포함하고 있어 대지 전계의 세기를 관측하는 것으로 뇌운의 활동과 낙뢰 발생의 예지가 가능하다.

## 2.2 대지전계 측정장치

지상에서 뇌운에 의한 대지전계의 세기를 측정하는 방법에는 침단 코로나 전류검출과 필드밀이 있다.

침단 코로나 방식은 구성이 간단하고 침단의 절연을 높이지 않아도 된다는 장점이 있어 지상 또는 수면에 존재하는 전계의 측정에 널리 활용되고 있다. 그러나 이 방법은 1~2[kV/m] 이하의 전계는 측정할 수 없고, 침단 부식에 의한 특성변화로 측정 오차를 유발하는 등의 단점을 갖고 있어 저전계 영역이나 우기 및 다습한 기후에서의 전계 측정에는 부적합하다.

필드밀을 이용한 전계 측정은 정전계는 물론 아주 느린 전계 변화를 측정할 수 있으며, 감도가 우수하기 때문에 지표면에서의 대지전계뿐만 아니라 기구나 비행선상에서의 전계 측정도 가능하다. 필드밀은 원통형(cylindrical type)과 평면 셔터형(planar shutter type)의 두 가지 구조가 있으며, 원통형은 대기 중 전계 측정에 주로 사용되고, 평면 셔터형은 지표면에서의 대지전계를 측정하는데 사용된다[7-8].

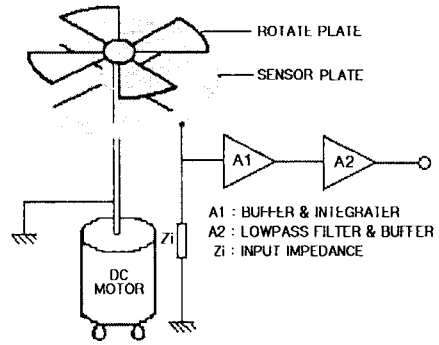
본 논문에서는 구조와 제작의 용이성 등을 검토하여 지상에서 대지전계의 측정에 가장 적합한 평면 셔터형 필드밀을 설계·제작하였다. 필드밀을 이용한 전계 측정은 일정한 면적의 도체 표면에 유기되는 전하량을 측정하여 입사되는 전계를 측정하는 방법의 일종으로써, 인위적으로 입사 전계를 변화시킨다는 주요한 특징을 갖고 있다.

### 3. 필드밀의 설계 및 제작

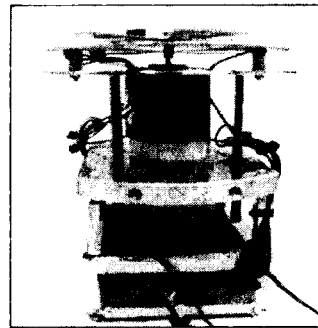
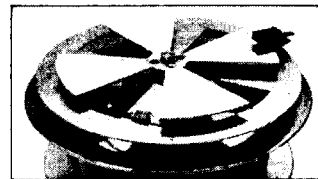
본 논문에서 설계·제작한 필드밀의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 센서전극인 고정판과 접지에 연결되어 차폐전극으로 작용하는 회전판으로 구성되며, 각각 4개의 다중전극 구조이다. 회전판은 직류전동기의 축에 연결되어 회전함으로써 센서전극이 입사전계에 대해 노출과 차폐를 반복한다. 고정판과 회전판의 재질은 가볍고 내부식성과 가공성이 우수한 알루미늄판을 사용하였다. 회전전극의 위치검출에는 포토커플러(photo coupler)를 그림 3과 같이 센서전극의 가장자리에 설치하였다. 또한 필드밀을 대기에 노출시켜 우천시에도 상시 대지전계의 측정이 가능하도록 필드밀의 상부는 아크릴계 수지의 용기로 밀폐하였다.

그림 3 (a)에서 전계 입사 후 센서전극이 회전판에

의해 차폐되면 축적된 전하는 임피던스를 통해 전달되며, 정전계하에서 유도된 전하는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[12].



(a) 구조



(b) 외형

그림 3. 필드밀의 개략도와 사진  
Fig. 3. Schematics and photograph of the EFM

$$q = \int \bar{D} d\bar{A} = \epsilon_0 EA [C] \quad (6)$$

여기서  $\bar{D}$ 는 전속밀도,  $A$ 는 센서전극의 단면적이 나타낸다. 센서전극이 차폐전극의 회전에 의해 노출되는 단면적  $a[\text{mm}^2]$ 는

$$a = \frac{A(1 + \sin \omega t)}{2} [\text{mm}^2] \quad (7)$$

대기전계 측정을 위한 필드밀의 설계 및 제작

로 나타낼 수 있으며, 여기서  $\omega$ 는 각속도이다.

그러므로 센서전극에 축적되는 전하  $q$ 는

$$q = \frac{\epsilon_0 EA(1 + \sin \omega t)}{2} [C] \quad (8)$$

이 된다.

입력임피던스  $Z_i$  양단의 순시전압  $v(t)$ 는

$$v(t) = Z_i \frac{dq}{dt} = \frac{\epsilon_0 EA \omega}{2} Z_i \cos \omega t [V] \quad (9)$$

가 된다.

입력 임피던스  $Z_i$ 는 일반적으로 회로의 입력 정전용량  $C$ 와 입력 저항  $R$ 로 구성되며,

$(\omega RC)^2 \ll 1$  인 조건에서 전압  $v_L$ 은

$$v_L = \frac{\epsilon_0 EA \omega R}{2} [V] \quad (10)$$

로 주파수의 함수가 되며,  $(\omega RC)^2 \gg 1$  인 조건에서 전압  $v_h$ 는

$$v_h = \frac{\epsilon_0 EA}{2C} [V] \quad (11)$$

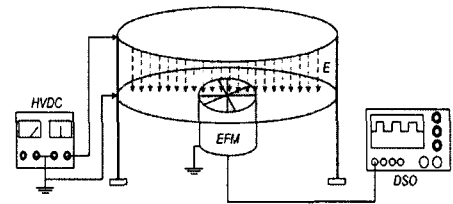
로 주파수의 함수가 아님을 알 수 있다.

시제작 필드밀의 센서전극 출력단에 접속되는 버퍼 증폭기의 입력저항은  $100[M\Omega]$ , 입력 정전용량은  $100[nF]$ 이며, 차폐전극 회전용 전동기의 회전수는  $1800[rpm]$ 으로, 정전계에 대해 충분한 응답특성을 갖도록 설계하였다. 또한 내부 전동기 회전시 발생하는 잡음과 외부의 잡음 발생원에 대해 전자회로가 영향을 받지 않도록 고입력 임피던스의 증폭회로는 정전차폐하고 최종 출력단에는  $-3[dB]$ 의 차단주파수가  $10[Hz]$ 인 저역통과필터를 설치함으로써 측정의 안정도와 정확도를 향상시켰다. 출력전압의 원거리 측정을 고려하여 전송선로에서 주변 전력회로로부터 유도전압에 의한 오차가 발생하지 않도록 임피던스 변환회로도 설치되어 있다.

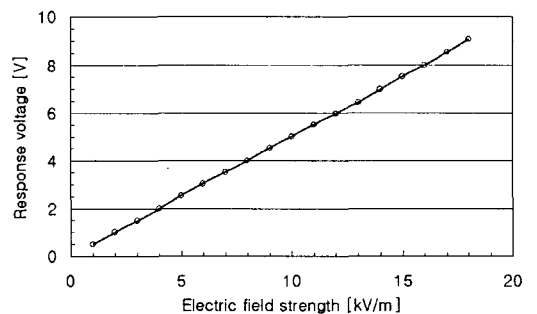
#### 4. 특성 평가

시제작 필드밀의 입사전계에 대한 출력전압 즉, 감도와 선형성의 평가가 필요하다. 이들 특성평가를 위한 실험계는 그림 4 (a)와 같이 상하부에 직경  $1000[mm]$ 의 원형 동판을 설치하고 가장자리는 직경  $50[mm]$ 의 금속 파이프로 마무리하여 모서리 부분에서 전계의 왜곡이 발생하지 않도록 하였다[13-14]. 상하부 원판의 간격은  $500[mm]$ 이며, 하부 원판의 중앙에는 시제작한 필드밀이 설치되어 있다. 상하부 평판 사이에 전계 형성을 위하여 정격 DC  $\pm 10[kV]$ ,  $5[mA]$ 의 고전압 발생장치를 이용하고 정(+), 부(-)극성 전계 입력에 대한 필드밀의 출력전압을 평가하였다.

필드밀의 감도는 내부 증폭기의 이득을 조절하여  $0.2[V/kV/m]$ 와  $0.5[V/kV/m]$ 로 선택이 가능하며, 본 실험에서는  $0.5[V/kV/m]$ 로 설정하여 최대  $20[kV/m]$ 까지의 전계를 측정할 수 있도록 하였다. 그림 4(b)는 교정실험으로부터 평가된 필드밀의 응답특성으로 입사 전계에 대해 선형적인 특성을 나타낸다.



(a) 개략도



(b) 출력특성

그림 4. 교정 실험

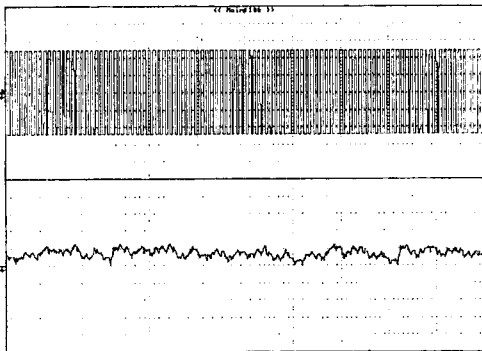
Fig. 4. Calibration experimentation

### 5. 대지전계의 측정

시제작 필드밀의 감도를 산출한 후, 뇌운하에서 대지 전계를 측정하기 위하여 지상 18.5[m]의 건축물 옥상에 필드밀을 그림 5와 같이 설치하였다. 필드밀 구동용 직류전원과 출력전압의 기록을 위한 관측장치는 전선 길이로 15[m] 떨어진 실험실에 위치하며, 필드밀의 외함은 지중에 매설되어 있는 단독 접지극에 접속되어 있다. 필드밀 출력전압 즉, 대지전계 변화 관측에 사용된 계측기는 수직 분해능 12[bit], 수평 분해능 5~100[S/s]로 설정하여 1시간마다 측정데이터를 자동으로 저장한다.

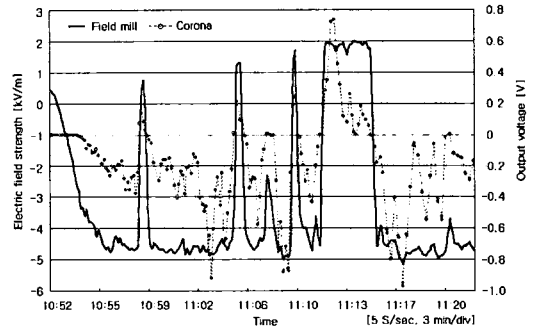


그림 5. 필드밀의 설치  
Fig. 5. Installation of the prototype field mill

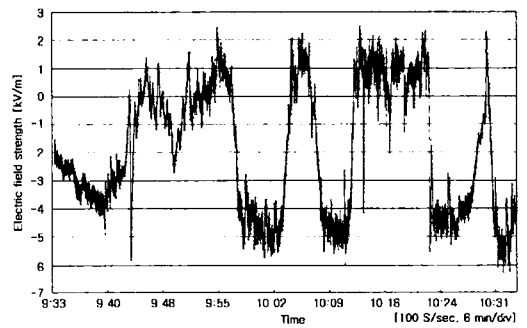


상 : 위치검출펄스(5[V/div], 50[ms/div])  
하 : 필드밀 출력(50[mV/div], 50[ms/div])

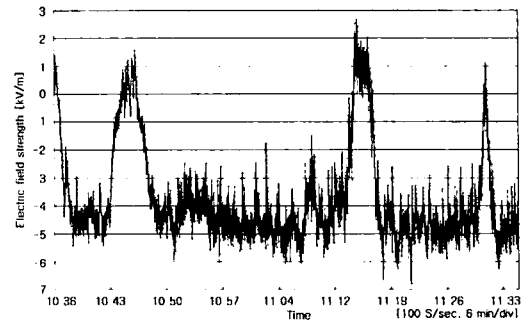
그림 6. 잡음 평가  
Fig. 6. Noise estimation



(a) 2006.07.01



(b) 2006.07.04



(c) 2006.07.04

그림 7. 대지전계의 측정  
Fig. 7. Measurement of the ground-level electric field

그림 6은 필드밀 설치환경에서 필드밀의 센서전극을 접지된 동판으로 차폐시킨 후 출력특성을 나타낸 것으로, 필드밀의 동작상태는 회전전극의 위치를 나타내는 펄스신호(100[Hz])로부터 알 수 있다. 이와 같이 대기 중에 차폐된 상태에서 필드밀의 회로잡음과 외부 유도에 의한 잡음을 평가할 수 있었으며, 최

## 대지전계 측정을 위한 필드밀의 설계 및 제작

대 잡음레벨은 50[mV<sub>p-p</sub>]로 전계강도로 환산하면 100[V/m]가 된다.

그림 7에 2006년 7월 1일~2006년 7월 4일중 1시간 단위로 기록된 대지전계의 변화의 예를 나타내었다. 뇌운의 이동, 뇌전하의 생성과 소멸 등으로 대지전계의 세기가 변화하는 것을 분석할 수 있다.

그림 7 (a)는 본 연구에서 제작한 필드밀과 침단코로나 전극 방식의 대지전계 측정장치의 출력을 비교한 것이다. 필드밀의 출력전압은 측정영역에서 전계 변화에 따라 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있으나, 침단 코로나 방식은 이미 잘 알려져 있는 바와 같이 일정 전계이상에서만 코로나 전류의 크기가 흐르고, 코로나전류 개시전계의 세기도 일정하지 않음을 알 수 있다.

본 측정 기간 중 대부분의 경우에 부극성 전계가 강하게 나타나고 있는데, 이는 우리나라의 하계 뇌운의 구조가 그림 1의 모델에서와 같이 하부에 음(-) 전하가 존재하기 때문이다. 또한 수차레에 걸쳐 전계가 부극성에서 정극성으로 급변하는 것을 볼 수 있다. 이는 운(간)방전에 의해 음전하가 소멸되면서 나타나는 현상이며, 뇌운의 이동이나 뇌운내의 음(-) 전하가 다시 생성되면서 다시 부극성 전계로 변화하는 것으로 추정된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 뇌운 경보기의 핵심 부품으로 뇌운의 접근에 따른 대지전계의 변화를 측정하기 위하여 필드밀의 원리를 해석하고, 대지전계의 측정에 적합한 평면 셔터형 필드밀을 설계·제작하였다. 감도 분석과 교정을 위해 원판형 전극계에서 평등전계를 형성시켜 입사 전계에 대한 필드밀의 응답특성을 분석하였으며, 필드밀의 감도는 0.5[V/kV/m]가 되도록 설정하였다.

시제작 필드밀을 지상으로부터 18.5[m]에 위치한 건축물 옥상에 설치하여 대지전계의 변화를 기록하였다. 본 연구기간 동안 뇌운의 생성과 소멸, 접근 등에 따라 대지 전계는 +2[kV/m]~-6[kV/m]의 변화가 측정되었다. 측정 결과로부터 시제작한 필드밀은 뇌운에 의한 대지전계의 변화를 분석하는 데 충분한

성능이 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제작한 평면 셔터형 필드밀은 뇌운경보기용 센서 외에도 직류송전선로에서 전계 측정이나 정전계가 사용되는 관련 산업분야에서 활용이 가능할 것으로 기대한다.

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업(R-2006-1-206)의 지원으로 수행되었음.

## References

- [1] 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.
- [2] W. P. Winn and C. B. Moore, "Electric Field Measurements in Thunderclouds Using Instrumented Rockets", J. Geophys. Res., Vol. 76, No. 21, pp. 5003~5017, 1971.
- [3] Gyung-suk Kil, et al., "A Study on Development of the Lightning Warning System", KIMCS Spring Conference, Vol. 10, No. 1, pp. 274~277, 2006.
- [4] Kohichi Nakamura, et al., "Development of a Lightning Warning Device Utilizing Point Discharge Current", Trans. of IEEJ, Vol. 101B, No. 2, pp. 33~40, 1981.
- [5] S. G. Cathman, "Improved Field-meter for Electrostatic Measurements", Rev. Sci. Instrum., Vol. 36, No. 10, pp. 1490~1493, 1965.
- [6] P. E. Secker and J. N. Chubb, "Instrument for Electrostatic Measurements", J. Electrostatics, Vol. 16, pp. 1~19, 1984.
- [7] S. G. Cathman, "Guarded Double Field Meter", Rev. Sci. Instrum., Vol. 39, No. 1, pp. 43~47, 1968.
- [8] 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.
- [9] M. A. Uman, E. P. Krider, "A Review of Natural Lightning: Experimental Data and Modeling", IEEE Trans., Vol. EMC-24, No. 2, pp. 79~105, 1982.
- [10] M. A. Uman, The Lightning Discharge, Academic Press, INC., pp. 1~70, 1987.
- [11] M. A. Uman, "Natural Lightning", IEEE Trans. Industry Application, Vol. 30, No. 3, pp. 785~790, 1994.
- [12] Mazen Abdel-Salam, et al., High-Voltage Engineering, 2nd Edition, Marcel Dekker, INC., pp. 596~597, 2000.

## ◇ 저자소개 ◇

### 길경석 (吉暻碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 3월~2004년 2월 영국 카디프대학 방문교수. 1996년~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수.

E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

### 송재용 (宋在鏞)

1975년 1월 28일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2006년 3월~현재 한국해양대학교 산업기술연구소 연구원.

E-mail : hvlab@dreamwiz.com

### 김일권 (金一權)

1974년 1월 24일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

E-mail : hvkwon@shinbiro.com

### 권장우 (權章禹)

1968년 4월 15일생. 1990년 인하대학교 전자공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1996년 10월~1998년 2월 특허청 심사관. 2002년 2월~현재 동명대학교 컴퓨터공학과 부교수.

E-mail : jwkwon@tit.ac.kr

### 안창환 (權章禹)

1959년 11월 4일생. 1983년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1991년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 인하대학원 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인하공업전문대학 디지털전자정보과 교수.

E-mail : aza@inhac.ac.kr

### 이영근 (李永根)

1954년 3월 14일생. 1976년 인하대학교 조선공학과 졸업. 1983년 대한조선공사 Project PM. 1990년~현재 한국이엠아이테크놀로지(주) 대표이사. 2005년~현재 기술표준원 IEC/TC81 피뢰전문위원.

E-mail : ykl@emitech.co.kr