工學碩士 學位論文

회전형 Field Mill을 이용한 뇌경보시스템 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Lightning Warning System Utilizing a Rotation-type Field Mill

指導教授　吉 暻 碩

2001年　2月

韓國海洋大學校 大學院

電 氣 工 學 科

千　相　奎

本 論文을 千相奎의

工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士　全 泰 寅　㊞

委　員 : 工學博士　吉 暻 碩　㊞

委　員 : 工學博士　河 潤 秀　㊞

2001年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科　千 相 奎

목 차

A Study on the Development of a Lightning Warning System Utilizing a Rotation-type Field Mill

by Cheon, Sang-Gyu

Department of Electrical Engineering
The Graduate School of Korea Maritime University
Pusan, Republic of Korea

Abstract

The objection of this study is to develop a lightning warning system based on the measurement of electric field intensity on the ground level.

In this thesis, changes of the electric field intensity formed by thunderclouds are theoretically described. 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 lightning warning system.

In order to accomplish the high sensitive lightning warning system, the principles and design rules of a rotation-type field mill are studied. The lightning warning system consists of the rotation-type field mill

as an electric field sensor, an impedance changer, and a two-stage amplifier.

The field mill is composed of two isolated electrode vanes, a grounded stator and a rotor. The impedance changer necessary to maximize the time-constant of the lightning warning system is designed by using an operational amplifier(CA3130) with extremely high input impedance of 1.5 [TΩ].

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. Maximum resolution of the developed lightning warning system is about 73 [V/m], and can be measured the electric field strength up to about 18.7 [kV/m]. For the purpose of measuring a higher level of the electric field strength, the sensitivity can be conveniently adjusted with a voltage divider in parallel connected to the output of the impedance changer.

To ensure the sensing ability of the developed lightning warning system in the actual situation, computer simulation using thundercloud models was carried out, and the result showed that the system can monitor the movement of thunderclouds within 6 [km] from the observation site.

그 림 및 표 목 차

< 그 림 목 차 >

< 표 목 차 >

제 1 장 서　론

대기 중에 있어서 시시각각 변화하는 전계의 측정은 매우 어렵다. 대기전계를 변화시키는 원인으로는 낙뢰(落雷)에 의한 것이 대부분을 차지하고 있으므로 뇌 발생시의 전계 측정은 뇌연구상 빠뜨릴 수 없는 분야이기도 하다. 낙뢰는 오랜 옛날부터 인간을 매료시켜온 하늘의 불꽃놀이이자 죽음과 파괴를 가져오는 위협적인 존재로 인식되어 왔다. 전 세계적으로 시간당 100만 번의 번개가 치는 것으로 보고되고 있는데, 이는 인명 피해는 물론이고 현대의 첨단 산업 기술에 치명적인 위협이 되고 있어 적절한 대응책이 요구된다. 특히 낙뢰는 전력수송설비의 사고 원인 중 거의 반수를 점하고 있는 실정이므로, 이러한 뇌에 의한 사고를 방지하기 위해서는 뇌운(雷雲)의 발생에 따른 전계 변화를 측정하여 이를 조기에 경보할 수 있는 시스템이 무엇보다 우선적으로 갖추어져야 될 것이다.

대기전계를 측정함에 있어 전계 측정에 관한 연구 과제에 따라서 측정의 분해능도 달라지고, 측정점도 지표면이나 상공 등 여러 갈래로 나누어지기 때문에 각각의 연구에 따른 특수한 연구가 이루어지고 있다. 지표면에서의 대기전계 측정에 관한 연구는 미국의 Kennedy Space Center와 일본 등지에서 활발히 진행되고 있고, 상공에서의 전계 측정은 주로 NASA에서 이루어지고 있다. 또한 로케트를 이용한 유뢰 실험으로 뇌운 중의 전계를 측정한 예도 다수 발표되고 있는데, 이들 연구의 자료들은 뇌예지 및 뇌연구에 널리 이용되고 있다[1] [12].

뇌방전에 의해 발생하는 장파 중파대의 전자계 변화 파형은 뇌방전의 종류, 뇌방전 전류 크기의 정보를 포함하고, 동시에 수 백 [km]의 거리를

비교적 안정적으로 전달한다[13]. 이 특성을 이용하여 광대역에서 수신한 자계 및 전계 신호로부터 낙뢰점의 위치표정을 실시간으로 하는 시스템이 세계적으로 널리 이용되고 있고, 국내에서도 기상청과 한국전력공사에서 낙뢰 관측 시스템을 운용하고 있다. 낙뢰 관측 시스템에는 LLP(Lightning Location and Protection)와 LPATS(Lightning Positioning and Tracking System)가 있다. LLP는 Uman, Krider 등이 고안한 것으로 방향 탐지(DF : Direction Finding)방식을 이용하는데, 직교 loop 안테나와 전계 안테나에 의해서 방위를 탐지함과 동시에 전자계 파형을 해석하고 낙뢰를 추출해서 극성 및 뇌격전류 파고값에 대응하는 최대 자계를 측정한다. 구조는 다지점 시스템으로 운용되고 CA(Central Analyzer)에서 삼각법의 위치추정 알고리즘에 의해서 낙뢰 발생 위치를 결정한다. LPATS는 복수 관측점에 전자파가 도달한 시각차를 해석해서 낙뢰 위치를 결정하므로 정밀도가 높고 GPS 기술의 채용에 의해 향후 보다 가능성 있는 기술로 평가되고 있다. 현재 우리 나라의 기상청에서는 LLP 시스템을, 한전에서는 LPATS를 각각 운용하고 있다.

이 낙뢰 관측 시스템에 의한 결과는 기상, 전력 계통, 항공 및 선박, 기타 여러 분야에 걸쳐 아주 폭넓게 활용되고 있다. 우리 나라에서는 기상청에서 10개의 낙뢰 탐지 수감부를 전국 각지에 설치하여 낙뢰 관측망을 구성하고 있지만, 그 효용 범위가 제한되어 있고 전량 수입에 의존하고 있으므로 실질적인 낙뢰 관측과 뇌경보시스템의 구성에 어려움이 있는 실정이다. 게다가 기후의 변화가 무상한 여름철이면 골프장 등지에서 낙뢰로 인한 인명 피해가 발생하고 있고, 또한 낙뢰로 인하여 중요 전산망 및 전자·통신 장비가 피해를 입는 사례가 발표되고 있으므로, 낙뢰 연구와 더불어 낙뢰 예지 및 경보시스템의 개발이 시급한 실정이다.

필드 밀(Field Mill)을 이용하여 다지점에서의 전계를 측정함으로써 뇌

운의 이동 방향과 속도 등 뇌운의 움직임을 추정할 수 있으므로, 본 연구에서는 지상에서 전계의 세기 변화에 기인하는 뇌운의 접근을 감지 가능한 고감도의 뇌경보시스템을 개발하는 것에 목적을 둔다.

뇌운에 의해 변화되는 대기의 전계를 측정하기 위해서 우선 뇌운의 일반적인 특성을 이해하고 대지전계 측정 장치의 원리를 파악하는 것이 필요하다. 대지전계는 필드 밀, 평판 안테나 또는 코로나 침을 이용하여 측정할 수 있다. 평판 안테나와 코로나 침을 이용한 방법은 비교적 간단하게 측정 장비를 구성할 수는 있지만, 정전계 영역과 1 2 [kV/m] 이하의 전계 측정이 불가능하다는 각각의 단점이 있으므로, 본 논문에서는 지상에서의 정전계 측정, 감도 등을 고려하여 회전형 필드 밀을 이용한 대지전계 측정장치에 관하여 연구하였다.

측정의 신뢰성과 장치의 내구성을 고려하여 2개의 vane을 가진 회전형 필드 밀을 제작하고, 임피던스 변환기 및 증폭기를 포함한 신호처리회로를 설계하여 뇌운의 접근을 조기에 감지할 수 있는 뇌경보시스템을 구성하였다. 교정실험에 있어서는 교정장치에 인위적인 전압을 공급함으로써 전계에 대한 센서의 감도와 주파수 대역을 파악하고자 하였고, 교정실험은 국제적인 규정(IEC, ANSI/IEEE Std.)을 근거로 한 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계를 이용하였다.

본 연구에서 제작된 교정실험장치로써 측정된 뇌경보시스템의 감도는 0.267 [mV/V/m]이고, 최소 73 [V/m]에서 최대 18.7 [kV/m]까지의 전계 측정범위를 갖는다. DC에서 200 [Hz]까지의 주파수 영역에서 안정적인 특성을 보였고, 이론적인 계산으로 얻어진 뇌운 전계의 변화값에 적용한 결과, 본 시스템은 약 6 [km] 거리까지 접근한 모든 뇌운을 감지할 수 있음을 확인하였다.

필드 밀은 맑은 날이나 구름 아래에 존재하는 비교적 안정한 전계를 감

지할 수 있고, 뇌운에 의한 전계 변화 및 정전 도장과 같이 직류 고전압을 이용하는 작업 환경에서의 전계를 측정할 수 있는 장치이다. 또한 필드 밀을 이용한 뇌경보시스템은 대지 또는 대기전계를 측정하는 것 외에도, 정전 방전에 의한 전자 장비의 upset에 대한 위험이나 구조물과 표면에서의 정전하에 의한 가연성 가스의 점화나 폭발의 위험 등을 평가하는 데에도 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다[14] [17].

제 2 장 이 론

뇌운의 발생으로 인하여 뇌운 중의 전하가 가진 에너지는 대기의 전계를 변화시킨다. 맑은 날 지상에서의 전계는 100 [V/m] 정도이지만, 낙뢰 발생 이전의 전계는 2 5 [kV/m] 정도로 증가하는 것으로 알려지고 있다[18]. 그러므로, 이 변화를 관측하고 해석함으로써 낙뢰의 발생을 조기에 예측 가능한데, 뇌방전에 의한 대기전계는 뇌운의 위치 및 크기, 진전과정에 따라 변화된다. 즉, 대기전계의 변화를 측정하는 것은 뇌운이 가진 정보를 간접적으로 얻는 것과 같으므로, 이 전계 변화 특성을 바탕으로 뇌운의 접근을 감지하는 것이 가능한 것이다. 본 장에서는 대지전계 측정에 의한 뇌경보시스템 개발을 위하여 뇌운에 의한 대지전계 변화를 이론적으로 해석하고, 대지전계 측정장치의 특성에 대하여 기술하였다.

2.1 뇌운에 의한 대지전계 변화

뇌방전은 일반적으로 뇌운에 의해서 발생되는데, 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[20]. 또한 뇌방전은 눈보라, 모래폭풍, 화산 폭발시 구름 위에서도 발생하며, 맑은 날씨에서도 발생하는 경우가 있다[21]. 그림 2.1은 뇌운의 전형적인 모델을 보여준다. 뇌운과 대지사이의 방전은 뇌운의 정(+)전하와 부(-)전하가 중성으로 되려는 일련의 과정으로써 플래쉬(Flash)라고 하며, 지속 시간은 대체로 0.01 2 [sec] 정도이다. 플래쉬는 여러 가지 방전 성분으로 구성되는데, 그 가운데 스트로크(Strokes)라고

불리는 3 4개 정도의 펄스 형태로 나타나는 높은 피크 전류가 포함되어 있다[20] [23].

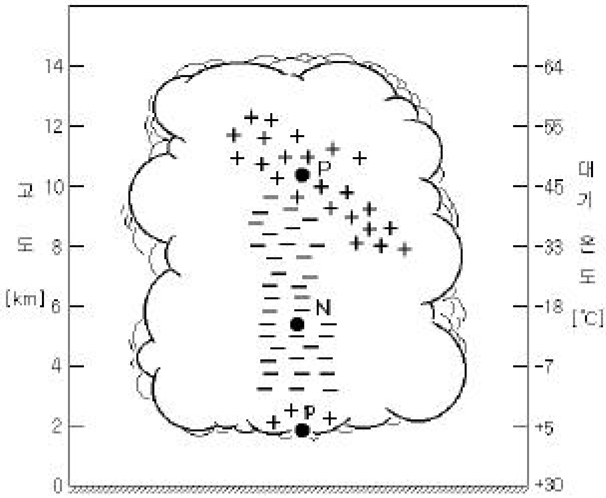


그림 2.1 **전형적인 뇌운의 모델**

Fig. 2.1 Typical thundercloud model

뇌운이 발생함에 따라 지표면에서의 전계는 뇌운이 가진 전하와 전류로 인해 거리에 따른 변화를 일으키게 되므로, **뇌운의 접근에 의해 나타나는 전계의 시간적 변화에 대해서 고려할 필요가 있다**. **우선**, **정지되어 있거나 서서히 변화하는 뇌운 전하의 분포에 의해 결정되는 전계의 세기에 대하여 살펴보자**. **대기나 진공중에서 정**(+)**의 점전하**(point charge)**로부터 거리** r **만큼 떨어진 곳에서의 전계의 세기** E**는 다음과 같이 구할 수 있다**[20].

$$E = \frac{Q\,\overline{\boldsymbol{a}_r}}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \quad [\mathrm{V/m}] \qquad (2.1)$$

여기서, $\overline{a_r}$은 점전하로부터 거리 r의 방향으로의 단위 벡터이고, ε_0는 진공중의 유전율로써 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m]이다. 만약 전계의 발생원이 부(-)의 점전하라면, 전계는 점전하를 향하는 방향으로 생성될 것이고, 식 (2.1)은 음(-)의 부호를 가진 값으로 될 것이다. 즉, 전계 벡터가 대지로 향하는 방향이면 점전하는 정(+)의 점전하이고, 반대로 대지로부터 나가는 방향이면 부(-)의 점전하라는 것이다. 이 개념은 뇌운 전하에 의한 전계를 해석함에 있어 유용하게 이용될 것이다.

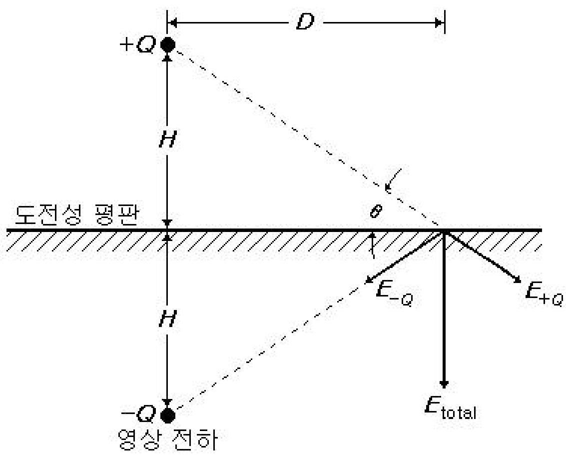


그림 2.2 전기영상법에 의한 전계 계산 모델

Fig. 2.2 Model for calculation of the electric field by the method of electrical image

대지면을 평행한 도전성 평판으로 간주하고, 뇌운 중심의 전하를 점전하로 간주하여 정(+), 부(-)전하가 서로 평판에 대해 대칭적으로 배열되어 있는 것으로 함으로써 전계의 세기를 계산할 수 있다. 도전성 평판으로부

터 높이 H에 위치된 점전하 $+Q$에 의해 발생되는 전계의 세기를 구하기 위해 전기영상법을 적용한다. 그림 2.2에 보인 것과 같이, 부(-)의 영상 전하 $-Q$를 평판 아래 높이 H인 지점에 둠으로써 평판상에 유기되는 전계의 세기를 구할 수 있다. 점전하로부터 높이 H, 거리 D 만큼 떨어진 평판상 임의의 점에서의 전계의 세기는 다음과 같다.

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 (H^2 + D^2)} \ [\mathrm{V/m}] \tag{2.2}$$

각각의 전하에 의한 전계 벡터는 서로 다른 방향으로 형성되므로, 총전계는 벡터를 더함으로써 얻어진다. 전계는 평판에 평행한 성분과 수직인 성분으로 분해될 수 있다. 수평 성분인 전계는 크기는 같고 방향이 반대이므로 서로 상쇄되어 도전성 평판에서의 수평 전계는 존재하지 않는다. 즉, 임의의 도전성 평판에서의 전계는 항상 표면에 수직인 성분이고, 총전계의 세기는 두 수직 성분의 합이 된다. 따라서, 각 점전하에 의한 수직 전계 성분은 전하에 의해 형성된 총전계와 $\sin\theta = H/(H^2 + D^2)^{1/2}$을 곱하여 다음과 같이 표현된다.

$$E_{\mathrm{total}} = \frac{2QH}{4\pi\varepsilon_0 (H^2 + D^2)^{3/2}} \ [\mathrm{V/m}] \tag{2.3}$$

이 전계는 평판에 수직인 방향이고 정(+)의 값이다. 만약 $D \gg H$인 관계라면, 식 (2.3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{total} \cong \frac{2QH}{4\pi\varepsilon_0 D^3} = \frac{M}{4\pi\varepsilon_0 D^3} \ [\mathrm{V/m}] \tag{2.4}$$

여기서, $M = 2QH$는 전하 $+Q$와 영상 전하의 전기 쌍극자 모멘트이다.

이와 같이 전하의 분포는 뇌운 사이에서 주어지는 전체 전기 쌍극자 모멘트의 분포라 할 수 있고, 전체 전기 쌍극자 모멘트를 얻기 위해 개개의 전하 또는 전하 덩어리에 의한 쌍극자 모멘트와 그 영상분을 합칠 수 있으며, 그 합은 다음과 같이 표현된다[20].

$$M = 2\sum_i Q_i H_i \tag{2.5}$$

여기서, 합성치는 대지 표면상에 존재하는 개개의 전하나 전하 덩어리를 총괄한 것이고, 부(-)극성 전하를 포함하는 항은 「-」부호로 표시된다.

위에서 설명된 바와 같이 뇌운은 근본적으로 수직 전기 쌍극자인데, 이것은 D의 함수로 뇌운의 접근에 따른 전계 변화 측정을 가능하게 하는 상부에 정(+)의 쌍극자를 가진 구조이다. 구름 안에서 대지까지의 고도 H_N으로부터 Q_N [C]의 부(-)전하의 방전에 기인하는 거리 D인 대지에서 측정한 정전계 변화는 식 (2.3)으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$E_{NG} = -\frac{2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q_N H_N}{(H_N^2 + D^2)^{3/2}} \ [\mathrm{V/m}] \tag{2.6}$$

이것은 D의 모든 값에 대하여 부(-)의 값이다. 만약 $D \gg H_N$이면, 쌍극자 모멘트 변화의 소거식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_{NG} = -2Q_N H_N = 4\pi\varepsilon_0 E_{NG} D^3 \quad (2.7)$$

구름에서 대지까지의 고도 H_P**로부터** Q_P [C]**의 정**(+)**전하의 방전에 기인하는 거리** D**인 대지에서 측정한 정전계 변화는 식** (2.3)**으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다**.

$$E_{PG} = +\frac{2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q_P H_P}{(H_P{}^2 + D^2)^{3/2}} \ [\mathrm{V/m}] \quad (2.8)$$

이것은 D**의 모든 값에 대하여 정**(+)**의 값이다**. **만약** $D \gg H_P$**라면**, **쌍극자 모멘트 변화의 소거식은 다음과 같이 쓸 수 있다**.

$$M_{PG} = +2Q_P H_P = 4\pi\varepsilon_0 \Delta E_{PG} D^3 \quad (2.9)$$

이와 같이, **뇌운의 발생에 의해서 발생하는 전계는 그 발생의 근원인 뇌운이 가진 전류 및 전하에 관한 정보를 포함하고 있고**, **또한 시변적인 거리 의존성을 갖고 있으므로 각 성분의 구성요소에 따라 파형의 크기와 형상이 변화한다**.

2.2 대지전계 측정장치

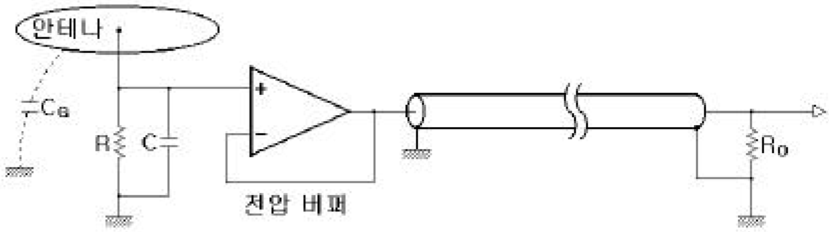
대지에서의 전계를 측정하는 방법으로는 크게 다음의 세 가지 방식이 이용된다. 첫 번째는 코로나 침을 이용하는 방식으로써, 이것은 강한 전계하에 침단이 있을 경우, 그 침단에 코로나 전류가 발생한다는 것을 이용하는 것이다. 침단이 임의의 임계값을 초과하는 전계에 노출되어 침단과 주변 공간 사이에 전위차가 발생하면, 침단에서는 코로나 방전이 일어나게 된다. 이 때 발생하는 방전 전류는 침단의 곡률 반경과 주변 전계의 세기에 의해 결정되므로, 침단에 흐르는 전류(I)와 전계(E) 사이의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[19],[20].

$$I = a\left(E^2 - E_0^2\right)\ [\mathrm{A}] \tag{2.1}$$

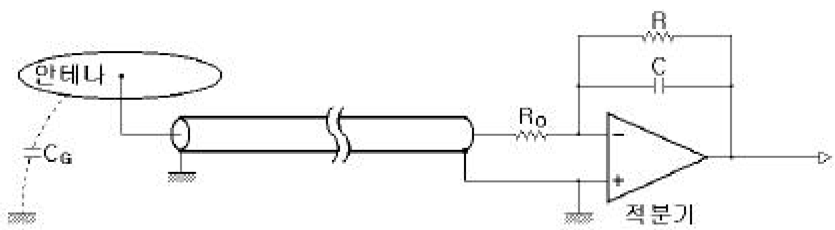
여기서, a는 상수로써 $10^{-13} \sim 10^{-16}\ [\mathrm{A \cdot m^2/V^2}]$이고, E_0는 코로나 개시 시의 전계 세기로써 $E \geq E_0$이다.

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[19].



(a) 저역 안테나



(b) 고역 안테나

그림 2.3 평판 안테나의 구성

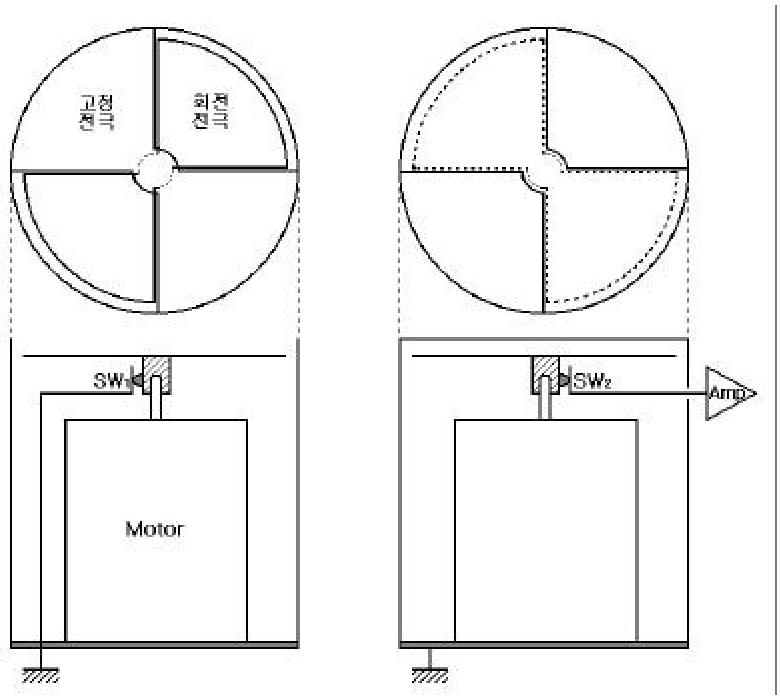
Fig. 2.3 Configurations of a plate antenna

그림 2.3의 (a)는 저역 안테나에 이용되는 측정회로이고, (b)는 고역 안테나에 이용되는 회로이다. 저역 안테나에 의한 측정은 뇌방전에 관한 파라메터의 수집 및 해석이나 기타의 방법으로 관측된 기록과의 관련성을 알기 위한 목적으로 사용되고 있고, 고역 안테나에 의한 측정은 주로 운내에 있어서의 뇌방전 개시부터 낙뢰까지의 전계 변화를 관측하기 위해 사용되고 있다. 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[19],[23].

세 번째는 회전형 필드 밀을 이용하여 대지전계를 측정하는 방식으로써, 측정원리는 다음 절에서 설명한다. 이 방식은 위에서의 두 가지 방식이 가진 단점을 보완할 수 있고 휴대가 가능하며, 활용 분야 또한 광범위하다[1] [5],[7],[9] [11].

2.3 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 전계를 측정하는데 사용된다. 본 연구에서는 지표면에서의 대지전계를 측정하기 위한 평면-셔터형 필드 밀을 적용하였다. 그림 2.4에 필드 밀의 기하학적 구조를 개략적으로 보여준다[11],[14],[18].

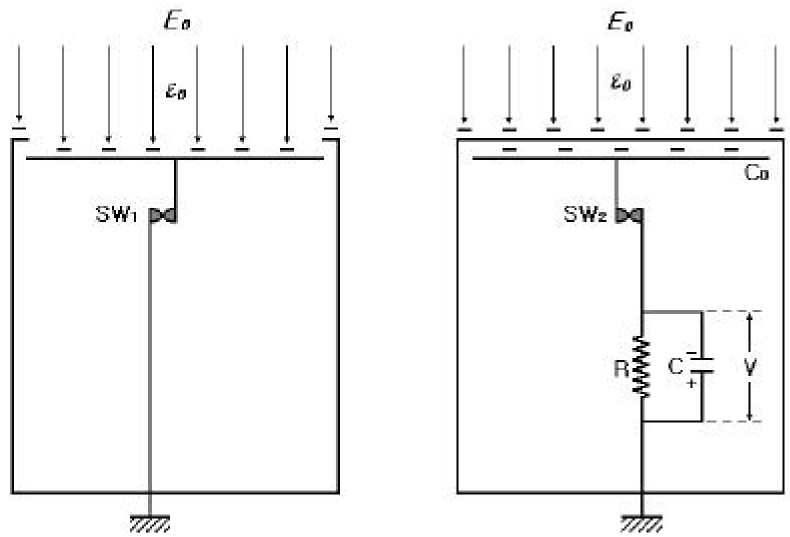


(a) 노출 (b) 차폐

그림 2.4 필드 밀의 구조

Fig. 2.4 Construction of a field mill

두 대칭적인 전극은 서로 절연되어 있고, 두 개의 부채꼴 모양의 날개를 가진 회전전극은 고정전극과 같은 중심축을 따라 수평으로 회전한다. 회전전극은 연속적으로 노출과 차폐를 반복하는데, 회전전극이 전계에 완전히 노출되어지는 순간 접지되고(그림 (a)), 그것이 90° 회전하여 완전히 차폐되어질 때 증폭기에 연결된다(그림 (b)). 그림 2.5는 필드 밀의 작동 원리를 도해한 것이다.



(a) 완전 노출　　　　(b) 완전 차폐

그림 2.5 필드 밀의 원리

Fig. 2.5 Principle of the field mill

회전전극이 전계에 대해 노출되는 면적을 S라 하면, 회전전극이 완전히 외부 전계에 노출되어질 때, 전극 표면에 대전되는 전하 Q_0는 다음과 같이 표현되어진다.

$$Q_0 = \varepsilon_0 E_0 S \ [\mathrm{C}] \tag{2.10}$$

여기서, ε_0는 진공중(공기중) 유전율, E_0는 회전전극 표면에 입사되는 전계의 세기이다.

접지면과 연결이 끊긴 후 대전된 전하 Q_0는 회전전극 표면에 포획되고, 회전전극의 이동에 의해 완전히 차폐된 상태에서는 C_0(회전전극과 고정전극 사이의 정전용량)에 운반됨과 동시에 스위치 SW_2에 의해 증폭기의 입력에 연결된다. 그림 2.6은 C_0에 충전된 전하가 증폭기로 전달되는 과정을 나타낸 것으로써, R과 C는 각각 필드 밀에서 증폭기로의 신호를 전송하는 동축케이블의 누설저항과 정전용량이다. 이 때 증폭기의 입력전위 V_0는 다음과 같이 주어진다.

$$V_0 = \frac{Q_0}{C_0 + C} = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \ [\mathrm{V}] \tag{2.11}$$

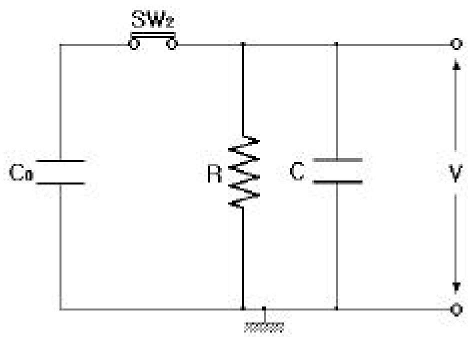


그림 2.6 포획된 전하의 전달과정

Fig. 2.6 Transfer process of the trapped charge

그 다음 과정으로 SW_2는 열리고 회전전극은 증폭기로부터 연결이 끊겨서 증폭기의 입력전위는 다음과 같이 감소된다.

$$V_1 = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} e^{-t_1/\tau} \text{ [V]} \tag{2.12}$$

여기서

$$\tau = RC \tag{2.13}$$

이고, t_1은 C에 첫 번째 충전이 된 후 감쇠되는 시간이다.

회전전극은 다시 외부 전계에 노출되고 대전된 전하를 포획한 다음 증폭기의 입력 회로에 연결되어지는데, 이 때 콘덴서 C에서의 총전하량은 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon_0 E_0 S + C V_1 = \varepsilon_0 E_0 S + \frac{C \varepsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} e^{-T/\tau} \text{ [C]} \tag{2.14}$$

여기서, T는 사용된 motor의 1/2회전 주기이다. SW_2가 열려 있을 때, C에서의 전하량은 이 값의 $C/(C_0 + C)$배로 주어진다. 따라서, 두 번째 충전한 후 증폭기의 입력전위는 다음과 같다.

$$V_2 = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \left(1 + \frac{C}{C_0 + C} e^{-T/\tau}\right) e^{-t_2/\tau} \text{ [V]} \tag{2.15}$$

그러므로 n 번째 충전 후의 전위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0 + C}\left(\sum_{n=1}^{n} r^{n-1}\right) e^{-t_n/\tau}\ [\mathrm{V}] \tag{2.16}$$

여기서

$$r \equiv \frac{C}{C_0 + C} e^{-T/\tau} \tag{2.17}$$

$|r| < 1$의 관계는 항상 성립하므로 식 (2.16)의 급수는 다음과 같이 수렴되어진다.

$$\sum_{n=1}^{n} r^{n-1} = \frac{1 - r^n}{1 - r} \tag{2.18}$$

C와 R의 값을 $\tau \gg T$가 되도록 선택한다면, $e^{-T/\tau} \simeq 1$의 관계가 성립하므로, $n \rightarrow \infty$로 될 때 다음과 같은 수식이 얻어진다.

$$V_\infty = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0} e^{-t_\infty/\tau}\ [\mathrm{V}] \tag{2.19}$$

또한 주기 T 동안 식 (2.19)에서의 지수항은 1이 되기 때문에, 증폭기에 걸리는 입력 전압은 결국 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0}\ [\mathrm{V}] \tag{2.20}$$

식 (2.20)은 E_0가 V 측정에 의해 얻어질 수 있음을 보인다. 이상의 결과와 같이 필드 밀을 통해 얻어진 신호는 회전전극의 총면적에 비례하고 정전용량 C_0에 반비례함을 알 수 있다.

필드 밀의 등가 임피던스 Z는 단락회로의 전류 I와 열린회로의 전압 V의 비율에 의해 정해진다. 그러므로 Z는 다음과 같이 표현되어진다.

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{Q_0/C_0}{Q_0/T} = \frac{T}{C_0} \ [\Omega] \qquad (2.21)$$

식 (2.21)로부터 Z는 정전용량 C_0와 주기 T의 비율로 주어짐을 알 수 있다. 이 임피던스는 증폭기가 필드 밀에 조합될 때 가장 중요한 요소 중의 하나이다.

외부 전계가 순간적으로 계단함수에 의해 0에서 E_0로 인가되어진다면, 필드 밀의 출력은 그림 2.7에 보인 것처럼 지수함수적으로 나타난다.

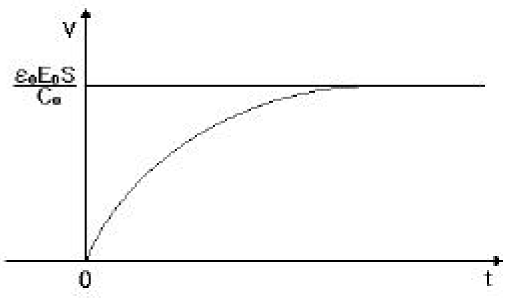


그림 2.7 필드 밀의 응답특성

Fig. 2.7 Response characteristics of the field mill

$\tau \gg T$인 조건을 고려하여 식 (2.16)에서 식 (2.19)까지의 수식으로부터 필드 밀의 시정수 τ_{FM}은 다음과 같이 계산되어진다.

$$\frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0}\left(1 - e^{-t/\tau_{FM}}\right) = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0 + C} \cdot \frac{1 - r^n}{1 - r} \qquad (2.22)$$

$r \simeq C/(C_0 + C)$에 따라 식 (2.22)는 다음으로 간략화된다.

$$e^{-t/\tau_{FM}} = r^n \qquad (2.23)$$

$t = \tau_{FM}$이 되기 위한 충전횟수 n_0는

$$n_0 = -\frac{1}{\ln r} = \frac{1}{\ln\left(\frac{C_0 + C}{C}\right)} \qquad (2.24)$$

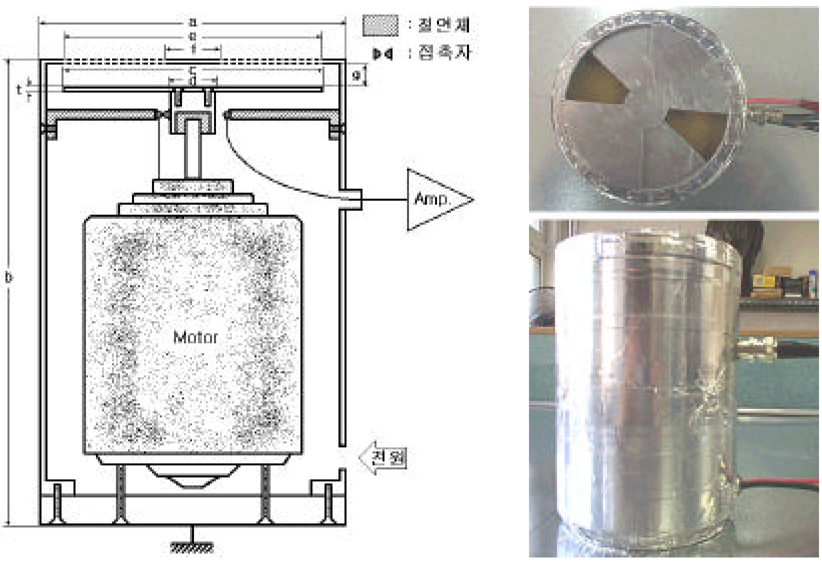
로 되므로, 회전전극의 주기 T를 고려한 필드 밀의 시정수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_0 T = \frac{T}{\ln\left(\frac{C_0 + C}{C}\right)} \qquad (2.25)$$

제 3 장 뇌경보시스템의 구성

3.1 회전형 필드 밀을 이용한 대지전계 측정

필드 밀을 이용한 전계 측정은 일정한 면적의 도체 표면상에 유기되는 전하량을 측정하여 입사되는 전계를 측정하는 방법의 일종으로써, 인위적으로 입사 전계를 변화시킨다는 주요한 특징을 갖고 있다. 전계를 변화시키기 위해서는 도체 표면을 노출/차폐시키기 위한 기계적인 장치가 필요하기 때문에 직류 motor를 이용하여 그림 3.1과 같은 전계 측정장치를 설계하였다. 그림 (a)는 장치의 개략적인 구성을 보여주고, (b)는 실험에 사용된 필드 밀의 사진을 보여준다.



(a) 필드 밀의 개략도 (b) 제작된 필드 밀의 사진

그림 3.1 필드 밀을 이용한 전계 측정장치

Fig. 3.1 Electric field measurement system utilizing the field mill

그림 3.1의 시제작된 필드 밀은 입력 전압이 DC 5.6 [V]인 1,800 [rpm]의 motor를 사용하였고, 회전전극과 고정전극은 모두 도전성과 가공성이 우수한 알루미늄판을 사용하였다. 시제작품의 외형적인 사양을 표 3.1에 나타내었다.

표 3.1 필드 밀의 사양

Table 3.1 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 갭	g	3.5
전 극 두 께	t	1.5

다음은 필드 밀의 등가회로 정수의 목록이다.

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d} = 7.84 \ [\mathrm{pF}]$$

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

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

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

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

$$\tau = RC = 4.55\ [sec]$$

$$V = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{C_0} = 0.350\ [V]$$ (E_0는 100[V/m]일 때)

$$I = \frac{\varepsilon_0 E_0 S}{T} = 1.64\times 10^{-10}\ [A]$$

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

$$\tau_{FM} = \frac{T}{\ln\left(\frac{C_0 + C}{C}\right)} = 1.947\ [sec]$$

여기서, 위 값들로부터 알 수 있듯이 τ는 신호입력회로의 시정수로써 $\tau \gg T$의 관계가 성립되고 필드 밀은 고(高) 임피던스를 가지므로, 신호처리회로는 반드시 임피던스 변환기의 특성을 가져야 된다.

3.2 뇌경보시스템

필드 밀로부터 얻어진 신호는 동축케이블(RG-58A/U)을 통해 신호처리 회로로 전송되어 전계 변화에 따른 측정 시스템을 구성하게 되는데, 외부의 불필요한 전자파 잡음과 오차를 최소화하기 위해 감지 전극부를 제외한 모든 부분은 차폐 구조로 설계하였다. 뇌경보시스템은 크게 임피던스 변환기 및 증폭기, A/D 변환기, MPU, Display 장치로 나눌 수 있으며, 필드 밀을 포함한 전체적인 시스템의 구성은 그림 3.2와 같다.

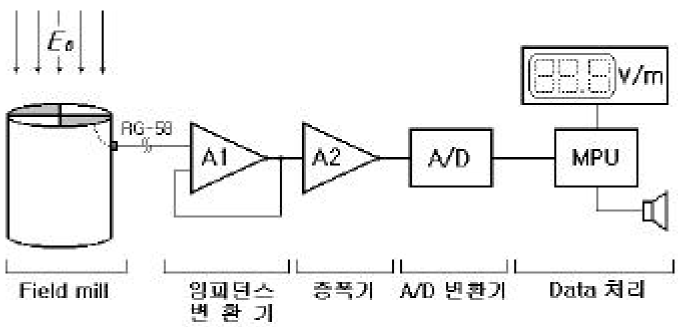


그림 3.2 뇌경보시스템의 구성

Fig. 3.2 Configuration of the lightning warning system

필드 밀이 가진 임피던스가 아주 높기 때문에, 그림 3.2에서의 증폭회로는 반드시 고(高) 임피던스 입력에 따른 임피던스 변환기 특성을 가진 회로가 포함되어야 된다. 그림 3.3은 임피던스 변환기를 포함한 증폭회로를 나타낸 것이다.

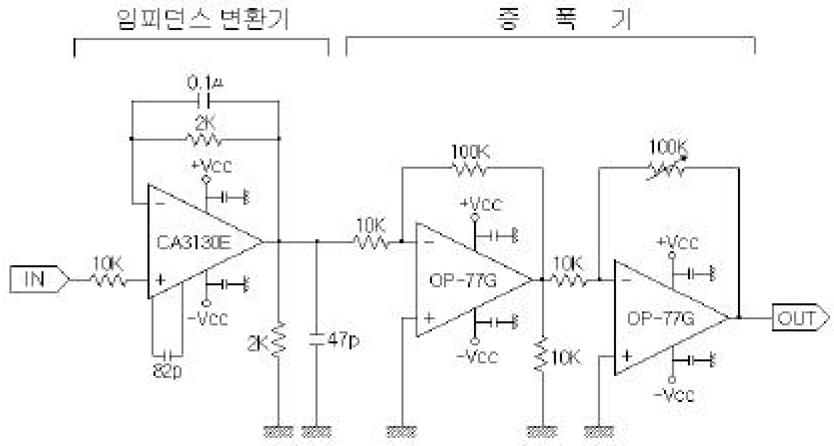


그림 3.3 **임피던스 변환기 및 증폭회로**

Fig. 3.3 Circuit for the impedance changer and amplifier

본 연구에서는 임피던스 변환기로 입력 임피던스가 1.5×10^{12} [Ω] **정도인** FET Op-amp(CA3130)**를 사용하였으며**, **이것을 지난 미소 전위를 증폭하기 위하여 고감도의 연산 증폭기** op-77**을 사용하였다**. **또한**, **아주 미소한 전계를 측정해야 하므로** 40 [dB] **정도의 이득을 얻기 위해** 2**단 증폭회로로 구성하였다**.

필드 밀의 기계적인 작용에 의해 발생된 신호는 회전전극의 노출 면적과 입사 전계의 세기에 비례하는 교번적인 신호를 포함한 DC **신호로 바뀌게 되고**, **증폭기에 의해 설계된 증폭률 만큼 증폭되어진다**.

증폭기를 통해 얻어진 신호를 LCD**로 나타내기 위해서는 디지털화 가능한 신호로 변환해 주어야 되므로** A/D **변환기를 삽입하였고**, A/D **변환기를 거친 최종적인 신호는 마이크로프로세서에 입력되도록 구성하였다**. **그림** 3.4**는** Tiny PLC **모듈**(TPC37)**을 이용한 경보 회로의 구성으로써**, **뇌운 이동에 의한 전계의 변화값에 따라 적절한 경보를 발할 수 있도록 하**

였다. 본 연구에서는 경보 등급을 4단계로 나누어 각각의 레벨을 경보할 수 있도록 하였고, 변화되는 전계값은 LCD에 출력되도록 프로그램 하였으며, 프로그램은 부록 Ⅰ에 수록하였다.

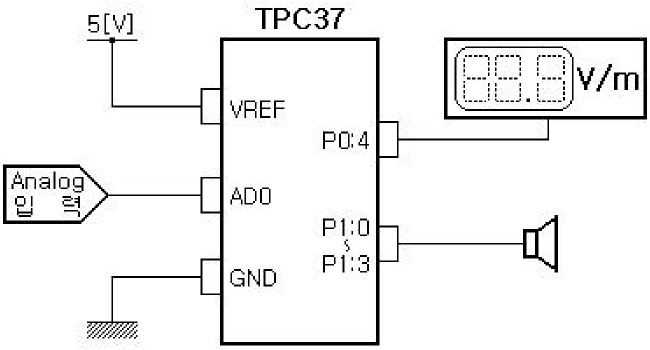


그림 3.4 경보 회로의 구성

Fig. 3.4 Configuration of the alarm circuit

제 4 장 교정장치 및 방법

4.1 교정장치의 설계 및 제작

회전형 필드 밀을 포함한 뇌경보시스템의 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[15],[24] [26].

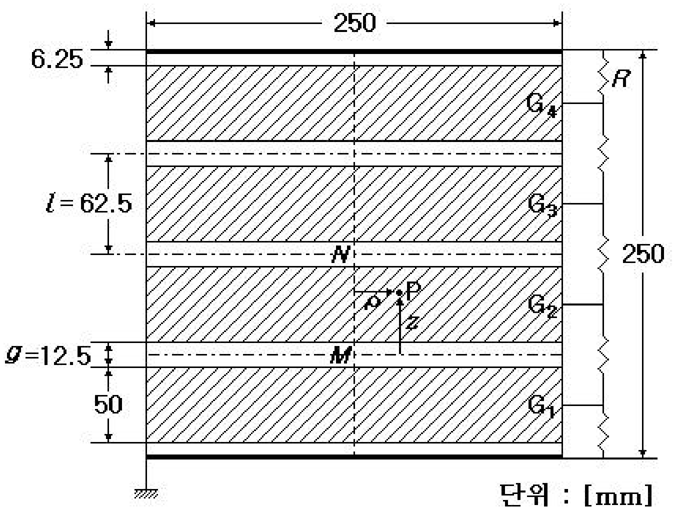


그림 4.1 원통형 가드전극계의 개략도

Fig. 4.1 Schematic diagram of the cylindrical guard electrode system

원통형 가드전극계의 교정용 실험장치는 그림 4.1과 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 4.1과 같이 구성되어 있고, 전극 G_1, G_2, G_3의 전위가 각각 $-1/2\ \Delta V$, $1/2\ \Delta V$, $3/2\ \Delta V$이고 M, N점의 전위가 각각 0, ΔV라 하자.

전극간 갭의 중앙인 평면의 중심으로부터 z, 수평축으로부터 ρ만큼 떨어진 점 P의 전위는 다음과 같이 표현된다[27],[28].

$$\phi_0 = \left[1 + 2\sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi\ mg/l)}{\pi\ mg/l} \frac{\sin(2\pi\ mz/l)}{2\pi\ mz/l} \frac{J_0(2\pi\ m\rho/l)}{J_0(2\pi\ mR/l)}\right]\frac{z}{l}\Delta V \qquad (4.1)$$

여기서, g는 갭의 길이, l은 인접전극의 중심간 거리, R은 센서의 반경, J_0는 영차 BESSEL함수, m은 정의 우수이다[29].

평등전계 영역을 넓히기 위해 l=62.5 [mm], g=12.5 [mm], R=125 [mm]로 하였으며, 이들의 값과 m=2로 하고 그 이상의 값을 무시하여 계산한 전위값 $\phi_0 = \Delta V\ z/l$인 이상치로 나눈 결과값은 표 4.1과 같고 계산 프로그램은 부록 II에 수록하였다. 계산 결과로부터 필드 밀 감지 전극부(ρ=55)에서는 완전 평등전계가 형성되고, 가드전극계의 최대 전계 변화는 0.06 [%] 이하로 됨을 알 수 있다.

표 4.1 (4.1)식의 괄호내항의 값

Table 4.1 The value of equation (4.1)'s inner term in parentheses

ρ \ z	4	7.5	11	14.5	18	21.5	25
35	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002
45	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002
55	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002	1.00000002
65	1.00000017	1.00000017	1.00000017	1.00000017	1.00000017	1.00000017	1.00000017
75	1.00000114	1.00000114	1.00000114	1.00000114	1.00000114	1.00000114	1.00000114
85	1.00000555	1.00000555	1.00000555	1.00000555	1.00000555	1.00000555	1.00000555
95	1.00002192	1.00002192	1.00002192	1.00002192	1.00002192	1.00002191	1.00002191
105	1.00007443	1.00007442	1.00007442	1.00007442	1.00007441	1.00007441	1.00007440
115	1.00022389	1.00022389	1.00022388	1.00022387	1.00022386	1.00022384	1.00022382
125	1.00060922	1.00060921	1.00060918	1.00060916	1.00060912	1.00060908	1.00060902

단위 : [mm]

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 가드전극계를 접지판에 설치하고 상부에 접지된 차폐전극을 설치함으로써 외부 잡음 즉, 상용주파수 60 [Hz] 교류전압에 의해 입사되는 외부 전계의 영향을 최소화할 수 있는 구조로 하였다. 따라서 원통형 가드전극계는 외부로부터 완전히 차폐된 상태에서 교정용 전압에 의한 전계만을 형성시킬 수 있으므로, 저전계 영역에서 뇌경보시스템의 주파수 대역을 평가하는데 용이하다.

평행평판 전극계는 그림 4.2와 같이 두 개의 사각 평판을 이용하여 전계센서의 입사면에서 평등전계가 형성되도록 구성하였다[30],[31]. 정사각형

의 평행평판 전극을 대지에 평행하게 두는 배치는 전극의 가장자리에서 높은 전계를 발생시키지만, 접지된 전극으로부터 높이 H와 한 변의 길이 L과의 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. 그림 4.3은 H/L의 값에 따른 중심선상에서의 전계 변화(E/E_0)의 상관 관계를 나타낸 것으로써, 본 연구의 실험과 같이 H/L가 0.25인 경우에는 중심에서 전계 변화가 0.3 [%] 이하를 나타내고 있다[31].

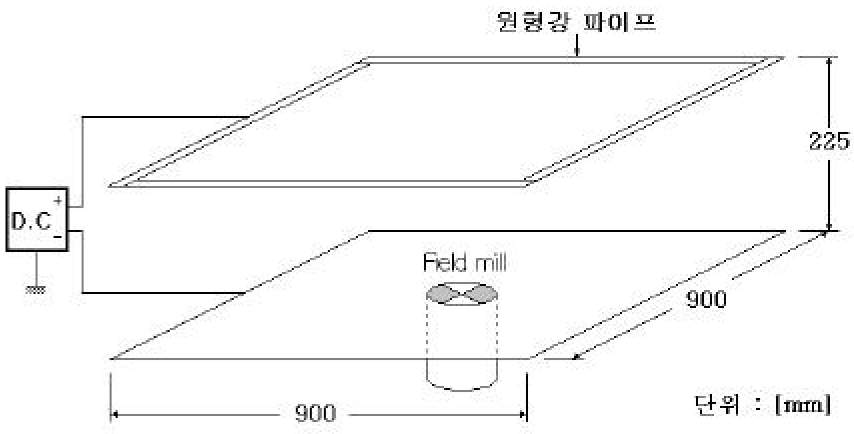
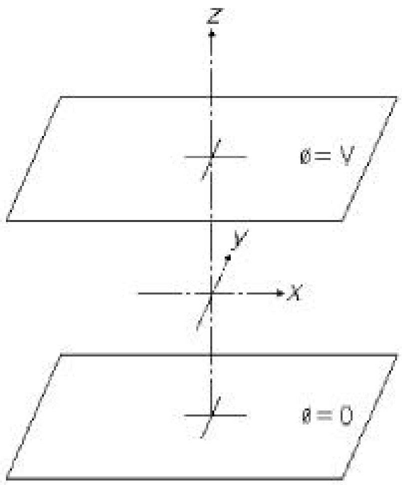
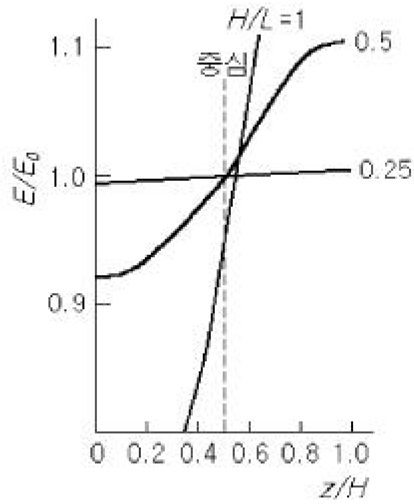


그림 4.2 평행평판 전극계의 개략도

Fig. 4.2 Schematic diagram of the parallel-plate electrode system



(a) **입체도**



(b) **응답특성**

그림 4.3 **평행평판 전극의 배치와 중심선상**($x=y=0$) **전계와의 관계**

Fig. 4.3 Relation between arrangement of parallel-plate electrode and electric field on the center line($x=y=0$)

4.2 교정방법

시제작한 뇌경보시스템의 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 개략도와 사진을 그림 4.4와 그림 4.5에 각각 나타내었다.

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

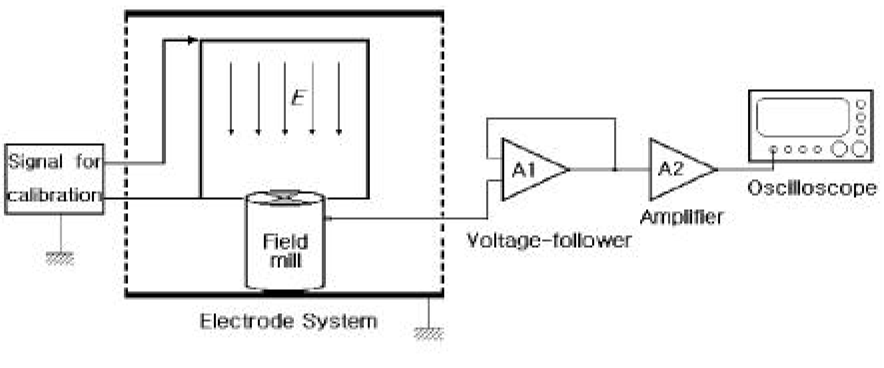
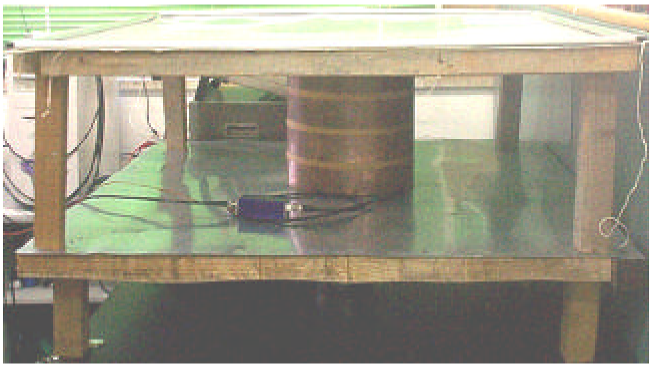


그림 4.4 교정용 실험장치의 개략도

Fig. 4.4 Schematic diagram of the experimental apparatus for calibration



(a) 원통형 가드전극계

(b) 평행평판 전극계

그림 4.5 교정용 실험장치의 사진

Fig. 4.5 Photographs of the experimental apparatus for calibration

제 5 장 실험결과 및 고찰

본 장에서는 회전형 필드 밀을 이용한 뇌경보시스템의 주파수 대역과 측정감도에 대하여 기술하였으며, 대지전계 측정에 의한 뇌경보기로서의 감지 능력에 대하여 고찰하였다.

5.1 주파수 대역 및 응답감도

뇌경보시스템의 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 뇌경보시스템의 출력전압을 비교하여 측정하였다.

그림 5.1은 뇌경보시스템의 주파수 응답특성을 나타낸 것으로 -3 [dB]의 상한 주파수는 약 200 [Hz]로 평가되었다. 따라서 본 뇌경보시스템은 35 [Hz] 이하의 주파수를 갖는 전계의 입사에 대해 감쇠 없는 정확한 값을 나타내지만 60 [Hz]의 교류전계에서는 6 [%] 감소한 값을 나타낼 것이다. 그러나 뇌경보시스템을 이용하는 목적이 뇌운에 의해 형성된 전계를 대지에서 관측함으로써 낙뢰를 예지하기 위함이고, 여러 관측자료에 따르면 뇌운의 변화는 정전계에서 수 [Hz] 이하로 보고되고 있으므로[20],[21], 본 연구에서 제작한 뇌경보시스템은 뇌운에 의한 대지전계의 측정에 적합하다.

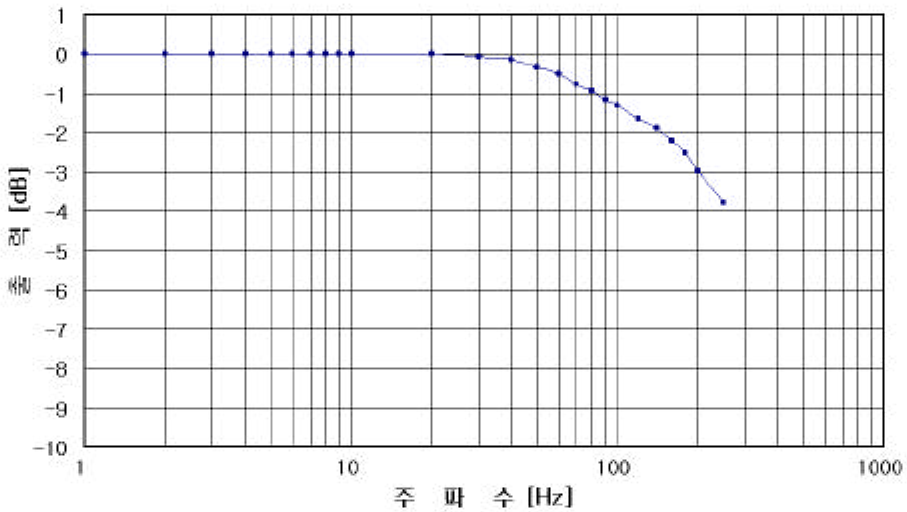


그림 5.1 **뇌경보시스템의 주파수 응답특성**

Fig. 5.1 Frequency response characteristics of the lightning warning system

그림 5.2**는 뇌경보시스템의 응답특성으로, 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계에 직류전압을 인가하여 형성된 전계의 세기와 뇌경보시스템의 출력전압을 나타낸 것이다. 회전형 필드 밀에 입사되는 전계의 세기를** 100 [V/m]**에서** 1 [kV/m]**까지 변화시켰으며, 이에 대한 뇌경보시스템의 출력전압은 그림과 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.**

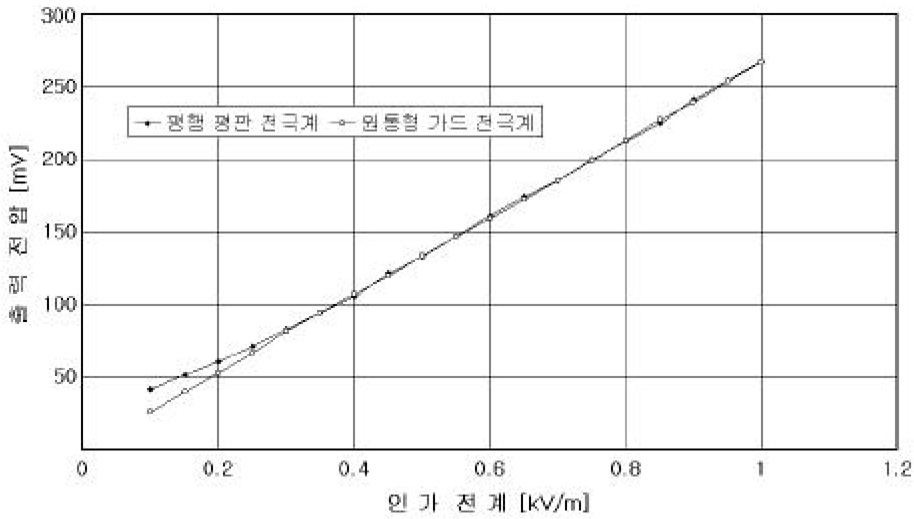


그림 5.2 **입사전계의 변화에 대한 뇌경보시스템의 응답특성**

Fig. 5.2 Response characteristics of the lightning warning system to change of the applied electric field

실험결과로부터 본 뇌경보시스템의 응답감도는 100 [V/m]**의 전계입력에서 출력전압이** 26.7 [mV]**이므로** 0.267 [mV/V/m]**임을 알 수 있다**. **그러나 실제 뇌경보시스템을 구성하는데 있어** A/D **변환기의 특성을 고려하면**, 8bit A/D **변환기를 사용하므로 최대** 5 [V] **입력에** 1 **레벨당** 19.5 [mV]**의 분해능을 갖기 때문에 대략** 73 [V/m]**가 판별 가능한 최대 분해능이 된다**.

이상의 실험결과로부터 얻어진 시스템의 성능을 표 5.1**에 요약하여 나타내었다**.

표 5.1 **시스템의 성능**

Table 5.1 Performances of the system

분 류	특 성
주파수 대역	DC 200 [Hz]
측 정 감 도	0.267 [mV/V/m]
측 정 범 위	73 [V/m] 18.7 [kV/m]
시정수(τ_{FM})	1.947 [sec]

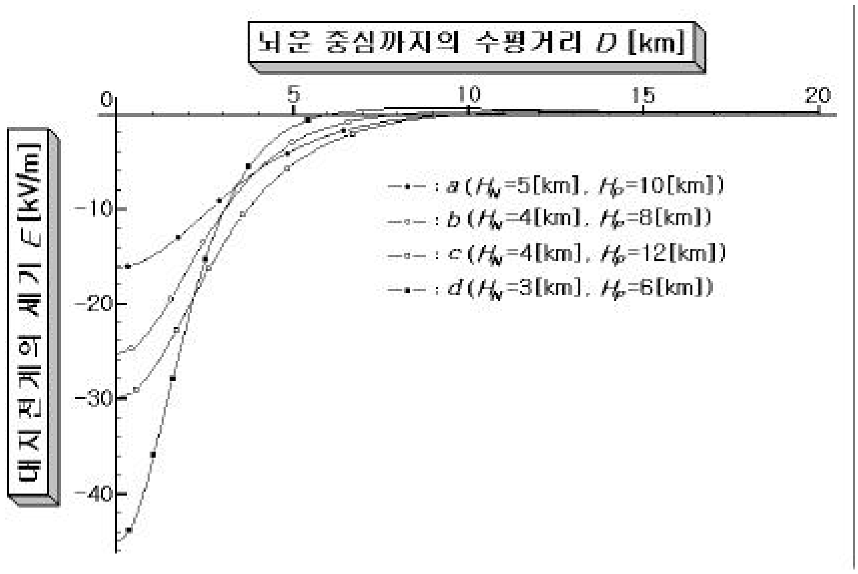
5.2 뇌경보 능력에 대한 이론적 고찰

본 연구에서 시제작된 뇌경보시스템으로 측정할 수 있는 감지거리는 대지전계를 구하는 이론적인 수식으로부터 해석이 가능하다. 그림 2.1의 뇌운 모델에서 수직으로 위치한 정(+)의 전기 쌍극자 일부분을 파괴하는 운내 방전에 의한 거리 D인 대지에서 측정한 정전계 변화를 $Q_N = Q_P = Q$로 놓고, 식 (2.6)과 식 (2.8)을 합하면, 다음과 같은 수식이 얻어진다.

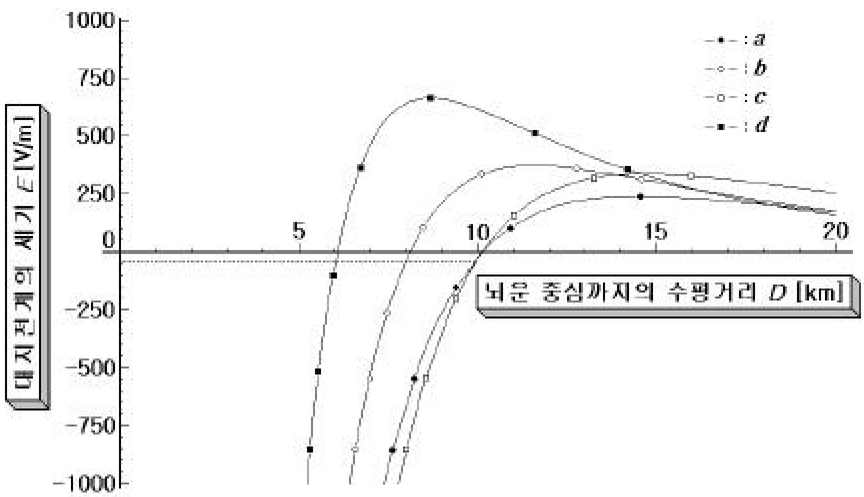
$$E_{PN} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0}\left[\frac{H_P}{(H_P^2 + D^2)^{3/2}} - \frac{H_N}{(H_N^2 + D^2)^{3/2}}\right][\mathrm{V/m}] \qquad (5.1)$$

여기서, 전계의 변화는 D가 증가하면서 부호가 반전되게 되므로, 작은 D에서의 전계 변화는 부(-)로, 큰 D에서의 전계 변화는 정(+)으로 된다.

그림 5.3에 식 (5.1)을 이용하여 뇌운 중심까지의 수평거리에 따른 전계의 변화 양상을 도식화하였다.



(a) **전체도**



(b) **확대도**

그림 5.3 **뇌운에 의한 대지에서의 전계 변화**

Fig. 5.3 Changes of electric field by a thundercloud at the ground

그림 (a)는 뇌운이 20 [km]의 거리에서 점차적으로 접근하는 경우의 전계 변화를 나타낸 것이고, 그림 (b)는 전계의 값이 -1 [kV/m] 1 [kV/m]가 되는 범위를 확대하여 나타낸 것이다.

뇌운 중에 포함된 전하의 평균값은 10 50 [C] 정도로 알려지고 있으므로[20], 식 (5.1)에서 Q=30 [C]으로 하여 H_N, H_P에 각각 임의의 수치를 대입하고, 대지전계 E와 거리 D와의 관계를 계산하면 그림 5.3의 곡선 *a*, *b*, *c*, *d*와 같다. 그림에서 대지전계의 세기는 극성 반전 후에 급격히 높아지고, 뇌경보시스템이 동작하기에 충분한 값까지 상승함을 알 수 있다. 극성이 반전되는 지점의 거리 D_0는 뇌운이 가진 전하량 Q에 무관하고, 뇌운 전하의 높이에 의존한다. 집중전하의 위치가 똑같은 그림 중의 곡선 *a*, *b*, *c*에서 살펴보면 D_0는 8 10 [km]가 됨을 알 수 있다.

또한 뇌경보시스템의 최대감도가 73 [V/m]이고, 이 전계값에 대한 측정점에서 뇌운까지의 거리는 *a*, *b*, *c*, *d* 곡선이 각각 9.7 [km], 7.9 [km], 9.8 [km], 6.0 [km] 정도를 나타내므로, 본 시스템은 대략 6 [km] 이내로 접근한 모든 뇌운의 감지와 이동상태를 분석할 수 있다.

본 연구에서 제작된 뇌경보시스템은 73 [V/m]에서 18.7 [kV/m]까지의 전계를 측정할 수 있는 신호처리회로를 구성하고 있다. 측정범위의 조정은 전압 버퍼의 출력신호를 분압하거나 자동이득조절장치(AGC)를 적용함으로써 가능하다.

본 연구를 수행함에 있어 모든 제작은 실험실내에서 수작업으로 수행하였기 때문에, 물리적인 정밀도나 안정성이 다소 부족하였다. 이는 직·간접적으로 전기적인 오차로 나타나 측정시 지시값의 오차를 유발하는 것으로 보인다. 향후, 신뢰성이 확보된 뇌경보시스템의 상용화에 있어서는 전

극 재료 및 절연 재료, 전동기 등의 선정과 장치의 가공방법 등에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 뇌운의 접근에 따른 대지전계의 변화를 측정하기 위하여 필드 밀의 원리를 해석하고, 이를 이용한 뇌경보시스템을 설계 · 제작하였다. 제작한 뇌경보시스템의 감도특성을 파악하기 위한 교정장치로 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계(ANSI/IEEE Std. 644)의 두 가지 방법을 이용하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 회전형 필드 밀을 이용함으로써 평판 안테나로써 측정할 수 없는 정전계 영역의 전계 측정이 가능함을 확인하였으며, -3 [dB]에서의 상한 주파수가 200 [Hz]이므로 뇌운 접근시의 전계변화 측정에 충분히 적용 가능함을 확인하였다.
2. 본 연구에서 설계 · 제작한 필드 밀의 최대감도는 0.267 [mV/ V/ m]로써 인가전계에 비례하는 선형적인 응답을 나타내었으며, 뇌경보시스템에서 분해 가능한 최대 분해능은 73 [V/ m]가 되었다.
3. 뇌경보시스템의 분해능을 고려하여 감지 가능한 뇌운의 접근범위를 이론적으로 산출한 결과, 자연 현상에서 발생 가능한 뇌운의 모델인 경우 대략 6 [km] 이내로 접근한 모든 뇌운에 대한 감지능력이 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 시제작한 뇌경보시스템은 고감도의 전계센서로 구성되어 있어 뇌운의 접근거리를 추정하는 것 외에도 정전 도장과 같이 직류 고전압을 이용하는 작업 환경에 직접적으로 적용되어 활용될 수 있을 것이다.

향후, 본 연구의 결과를 바탕으로 뇌경보시스템의 안정성과 신뢰성을

평가하기 위한 적용실험의 수행과 더불어 기계적인 오차를 최소화할 수 있는 방법을 확립함으로써 최적의 시스템 개발에 관한 연구가 수행되어야 될 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] S. G. Gathman, "A Field mill for Tethered Balloons", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 43, No. 12, pp. 1751 1754, 1972.

[2] S. G. Gathman, "Improved Field-meter for Electrostatic Measurements", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 36, No. 10, pp. 1490 1493, 1965.

[3] S. G. Gathman, "Guarded Double Field Meter", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 39, No. 1, pp. 43 47, 1968.

[4] T. P. Sheahen, "Model of Response of An Electric Field mill Operating During Suborbital Flight", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 45, No. 2, pp. 171 177, 1974.

[5] R. C. Waddel, "An Electric Field Meter for Use on Airplanes", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 19, No. 1, pp. 31 35, 1948.

[6] H. Dolezalek, "Passive Antenna and collector Antenna for the Measurement of the Atmospheric Electric Potential", *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, No. 18, pp. 5181, 1963.

[7] 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.

[8] E. A. Jacobson and E. P. Krider, "Electrostatic Field Changes Produced by Florida Lightning", *J. Atmos. Sci.*, Vol. 33, pp. 103 116, 1976.

[9] G. P. Harnwell and S. N. Van Voorhis, "An Electrostatic Generating Voltmeter", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 4, pp. 540 541, 1933.

[10] P. Kirkpatrick and I. Miyake, "A Generating Voltmeter for the

Measurement of High Potentials", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 3, No. 1, pp. 1 8, 1932.

[11] R. Gunn, "Principles of a New Portable Electrometer", *Phys. Rev.*, Vol. 40, pp. 307 312, 1932.

[12] R. Gunn, "The Electrical Charge on Precipitation at Various Altitudes and Its Relation to Thunderstorms", *Phys. Rev.*, Vol. 71, No. 3, pp. 181 186, 1947.

[13] **北條 準一 外**, **"落雷に伴う電磁界變化波形の特性と評價法"**, **日本電氣學會論文誌**, Vol. B-108, No. 4, pp. 165 172, 1998.

[14] 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.

[15] 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.

[16] P. E. Secker and J. N. Chubb, "Instrument for Electrostatic Measurements", *J. Electrostatics*, Vol. 16, pp. 1 19, 1984.

[17] P. S. Maruvada, P. D. Dallaire, R. Pedneault, "Development of Field-Mill Instruments for Ground-Level and Above-Ground Electric Field Measurement under HVDC Transmission Lines", *IEEE Trans.*, Vol. PAS-102, No. 3, pp. 738 744, 1983.

[18] T. Ogawa, "Analyses of Measurement Techniques of Electric Fields and Currents in the Atmosphere", Contributions, Geophysical Institute, Kyoto University, No. 13, pp. 111 122, 1973.

[19] **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.

[20] M. A. Uman, "Lightning", *Dover Publications Inc.*, New York, pp. 1 113, 1982.

[21] M. A. Uman, "Natural Lightning", *IEEE Trans. Ins. Appl.*, Vol. 30, No. 3, pp. 785 790, 1994.

[22] 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.

[23] M. A. Uman, "The Lightning Discharge", *Academic Press Inc.*, New York, pp. 1 36, 345 351, 1987.

[24] M. G. Comber, R. Kotter, R. McKnight, "Experimental Evaluation of Instruments for Measuring DC Transmission Line Electric Fields and Ion Currents", *IEEE Trans.*, Vol. PAS-102, No. 11, pp. 3549 3556, 1983.

[25] **길경석**, **송재용**, **김일권**, "**휴대용 극저주파 전장측정기 개발**", **한국센서학회지**, Vol. 9, No. 2, pp. 120 126, 2000.

[26] "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines", *ANSI/IEEE Std*. 664-1987, pp. 10 17, 1992.

[27] 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.

[28] A. Gilardini, "Low Energy Electron Collision in Gases", *John Wiley and Sons, Inc*., pp. 164 166, 1972.

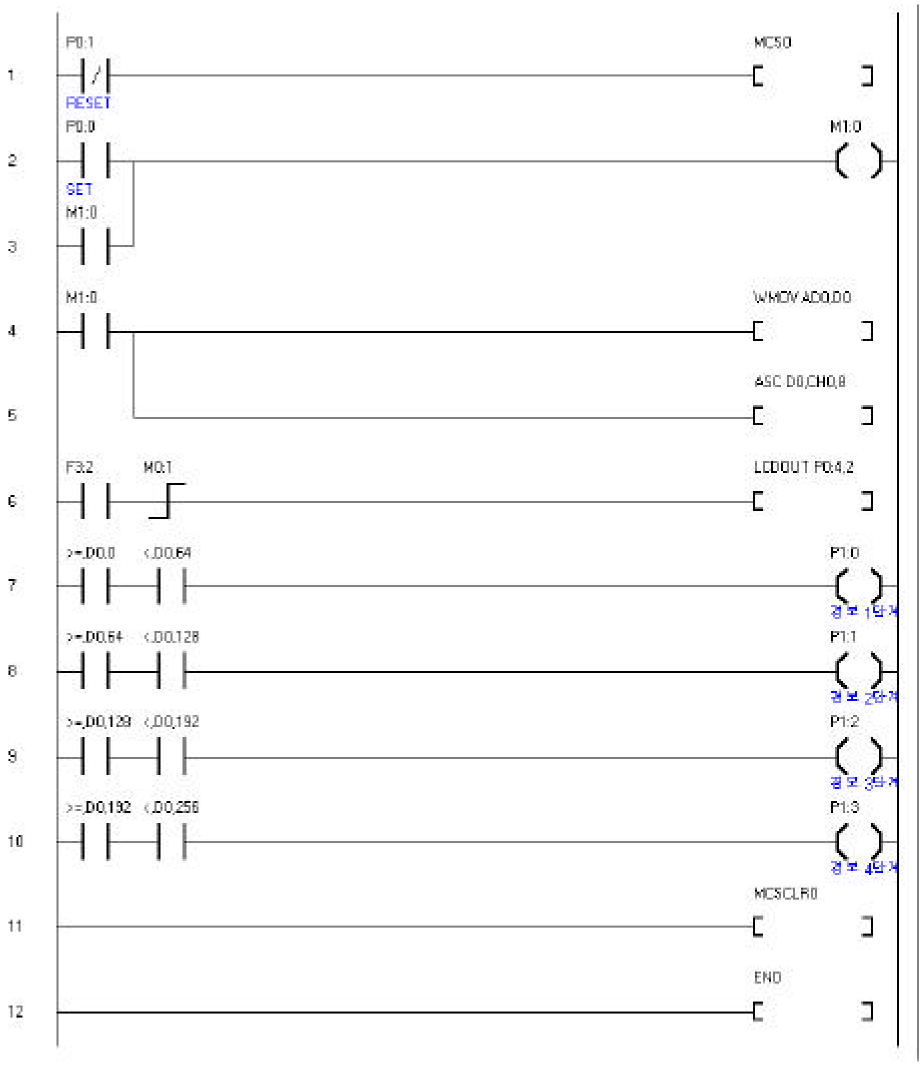
[29] E. Kreyszig, "Advanced Engineering Mathematics", *4th Edition, Wiley*, pp. 176 179, 1982.

[30] 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.

[31] **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.

부　　　록

Ⅰ. 그림 3.4의 Tiny PLC 프로그램



Ⅱ. 표 4.1의 계산 프로그램

```
# include <stdio.h>
# include <conio.h>
# include <math.h>

double J1, J2, K1, K2;
double R1, R2, R3, R4;
double RAD1, RAD2, RAD3, RAD4;
double a, b, qqq;

float G, L, C;
float z[7] = {0.40, 0.75, 1.10, 1.45, 1.80, 2.15, 2.50};
float r = 3.5;
float PHI = 3.14159265;

main()
{

int i, j;

        G = 1.25;
        L = 6.25;
        C = 12.5;

clrscr();

for(i=0 ; i<9 ; i++){
for(j=0 ; j<7 ; j++){

qqq = 256*24*24.;
a = 2*PHI*r/L;
b = 2*PHI*C/L;

J1 = 1-(a*a / 4)+(a*a*a*a / 64)-(a*a*a*a*a*a) / (64*36)
     +pow(a, 8) / qqq-pow(a, 10)/ 14745600;
```

```
J2 = 1-(b*b / 4)+(b*b*b*b / 64)-(b*b*b*b*b*b) / (64*36)
      +pow(a, 8) / qqq-pow(b, 10) / 14745600;

RAD1 = sin((2*PHI*z[j]) / L*(PHI/180));
RAD2 = sin((PHI*G) / L*(PHI/180));
RAD3 = sin(4*PHI*z[j] / L*(PHI/180));
RAD4 = sin(2*PHI*G / L*(PHI/180));

R1 = (RAD1) / (2*PHI*z[j]/L);
R2 = (RAD2) / (PHI*G/L);
R3 = (RAD3) / (4*PHI*z[j]/L);
R4 = (RAD4) / (2*PHI*G/L);

K1 = 2*J1*a/(J2*b)*R1*R2 + 1;
K2 = 2*J1*2*a/(J2*b*2)*R3*R4 + 1;
printf("%8.8lf ", K1);
}
printf("\n");
r+=1.0;
}

getch();
}
```

감사의 글

지난 2년 동안 부족한 저에게 격려와 조언을 아끼지 않으시며 오늘에 이르기까지 저를 물심양면으로 보살펴 주신 길경석 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 아울러 이 논문의 부족한 면을 보완할 수 있도록 심사를 맡아 세심한 배려와 정성으로 돌봐주신 전태인 교수님과 하윤수 교수님께 감사드리며, 이 논문을 작성할 수 있는 전기공학도로써의 역량을 심어주신 박관수 교수님, 이성근 교수님 그리고 이국 땅에 계신 김윤식 교수님께도 지면으로나마 감사의 말씀을 전합니다.

길지도 짧지도 않은 기간동안 고전압 연구실에서 한솥밥을 먹으며 동고동락했던 김일권, 이종혁 그리고 한주섭님, 송재용, 손원진에게 감사하단 말을 전하고 싶고, 직장 생활과 학업을 병행하느라 수고가 많은 김점식씨와 김명진에게도 감사의 마음을 전하며, 앞으로도 다정하고 활기 넘치는 연구실 생활이 되시길 기원합니다. 그리고 대학원 생활에 있어 더불어 사는 즐거움과 보람을 선사해준 여러 학우님들에게도 감사 드립니다.

오늘의 제가 있기까지 항상 정신적 지주로써 당신의 고생은 감수하시며 자식의 앞날만 걱정해 주신 부모님께 깊은 감사를 드리고, 철없는 동생을 위해 언제나 배려와 충고를 아끼지 않으신 형님들과 누님들에게도 감사의 말씀을 전합니다. 사랑스런 따님을 부족한 저를 믿고 맡겨 주신 장인, 장모님께 진심으로 감사드리고, 언제나 자기 일 같이 우리 내외를 돌봐주시는 처형 내외분과 처제, 처남에게도 감사의 마음을 전할까 합니다. 그리고 힘겹고 외로운 객지생활 동안 늘 곁에서 따뜻한 마음으로 감싸준 친구 이창익, 이명석에게 고맙다는 말을 전하고 싶고, 피를 나눈 형제와 같이 저를 아껴주고 격려해준 김옥진형에게도 감사를 드립니다. 또한 아름다운 추억을 나눠가졌던 고향 친구들을 비롯한 동의공업대학 및 한국해양대학교 친구들과 동생들에게도 이 글을 빌어 심심한 감사를 드립니다.

끝으로, 부족한 저를 평생의 반려자로 선택해 언제나 곁에서 믿음으로 뒷바라지해주는 사랑하는 나의 아내 신현정에게 충심으로 감사드리며, 갓 태어난 아들 재오와 함께 모든 의미와 기쁨을 같이 나누고 싶습니다.

2001년 새해를 맞이하며　　　　천 상 규 올림