

대지전장측정에 의한 뇌경보시스템 개발에 관한 연구

길경석*, 이성근*, 송재용*, 김점식*, 권장우**

A Study on the Development of a Lightning Warning System by the Measurement of Electric Field at the Ground

Gyung-Suk Kil*, Sung-Keun Lee*, Jae-Yong Song*,

Jum-Sik Kim*, Jang-Woo Kwon**

요 약

본 연구에서는 지상에서 전장의 세기를 측정하는 것에 의해 낙뢰 예측이 가능한 뇌경보시스템을 개발하였다. 뇌경보시스템은 전장센서로써 회전형 필드밀, 임피던스변환기, 2단 증폭기 및 마이크로프로세서로 구성되어 있다. 교정 실험결과로부터 뇌경보시스템의 주파수대역과 최대 분해능은 각각 DC ~ 200 [Hz], 73 [V/m]이었으며, 뇌운에 의한 대지전장의 세기를 18.7 [kV/m]까지 측정할 수 있음을 확인하였다.

실제 상황에서 본 뇌경보시스템의 감지능력을 평가하기 위하여 뇌운의 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 관측점으로부터 6 [km] 이내에 접근하는 뇌운의 움직임을 관측할 수 있었다.

Abstract

In this study, a lightning warning system (LWS) which can predict a lightning return stroke is developed, and the LWS is based on the measurement of electric field intensity at the ground level. The LWS consist of a rotation-type field mill as an electric field sensor, an impedance changer, a two-stage amplifier, and a microprocessor unit.

From the calibration experiment, the frequency bandwidth and the maximum resolution of the LWS are DC ~ 200 [Hz] and 73 [V/m], respectively. Also, the LWS can measure the electric field strength caused by a thunderstorm up to 18.7 [kV/m] at the ground.

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

1. 서 론

산업구조의 고도화로 전력수요가 급증함에 따

라 전력계통에서 송전효율의 극대화를 위한 전력 설비의 대용량화와 초고압화가 진행되고 있다. 전력계통에서의 일시적인 사고가 발생하면 유·무형의 막대한 경제적 손실을 초래하므로 전력공급의 고신뢰성이 요구되고 있는 실정이다. 특히, 전력계통에서 절연파괴 및 고장을 일으키는 원인으로는 자연현상의 낙뢰에 의한 것이 대부분이다.

낙뢰 발생전후에는 대지전장의 변화가 급격히

* 한국해양대학교 전기공학과(Dept. of Electrical Eng. Korea Maritime Univ.)

** 동명정보대학교 컴퓨터공학과(Dept. of Computer Eng. Tong Myong Univ.)

<접수일자 : 2001년 3월 19일>

일어나므로 대지전장의 측정에 의해 낙뢰를 포함한 뇌운의 접근과 낙뢰 경보에 대한 대책 마련이 가능하다. 그러므로 낙뢰 발생 전후의 전장 측정은 뇌방전에 관한 연구뿐만 아니라 전력계통의 신뢰성 확보에도 대단히 중요하다^[1,2].

또한 기후 변화가 심한 여름철이면 전력계통은 물론 중요 전산망 및 전자·통신 장비가 피해를 입는 사례가 발표되고 있으며, 골프장 등지에서 낙뢰로 인한 인명 피해가 발생하므로, 낙뢰 연구와 더불어 낙뢰 예지 및 경보시스템의 개발이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대지에서 전장 측정에 널리 사용되고 있는 필드 밀(Field Mill)을 이용하여 다지점에서의 대지전장을 측정함으로써 뇌운의 이동 방향과 속도 등, 뇌운의 움직임을 추정하여 대지전장변화에 따른 고감도의 뇌경보시스템을 개발하였다.

필드 밀을 이용한 뇌경보시스템은 비교적 안정하게 대지전장을 측정하여 습뢰시 낙뢰 예지를 통한 사고 예방에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 뇌경보시스템의 원리 및 구성

2.1 뇌운에 의한 대지전장의 변화

뇌방전은 일반적으로 뇌운에 의해서 발생되는데, 뇌운 중에서도 특히 상층의 대기와 하층의 대기가 불안정한 층으로 구성된 적란운(積亂雲)에 의한 것이 대부분이다.

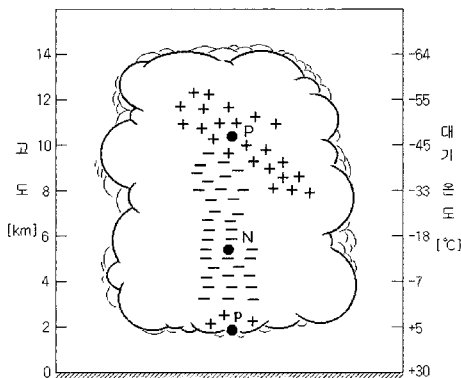


그림 1. 뇌운의 모델
Fig. 1. Typical thundercloud model

뇌운의 크기는 작게는 수 [km]에서 크게는 약 20 [km]에 이르기도 한다^[3]. 또한 뇌방전은 눈보라, 모래폭풍, 화산 폭발시 구름 위에서도 발생하며, 맑은 날씨에서도 발생하는 경우가 있다^[4]. 그림 1은 뇌운의 전형적인 모델을 보여준다. 뇌운과 대지사이의 방전은 뇌운의 정(+)-전하와 부(-)전하가 중성으로 되려는 일련의 과정으로써 플래시(flash)라고 하며, 지속 시간은 대체로 0.01~2 [s] 정도이다^[3~5].

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

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

여기서, $\overline{a_r}$ 은 점전하로부터 거리 r 의 방향으로의 단위 벡터이고, ϵ_0 는 진공중의 유전율로 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ [F/m]이다. 만약 전장의 발생원이 부(-)의 점전하라면, 전장은 점전하를 향하는 방향으로 생성될 것이고, 식 (1)은 음(-)의 부호를 가진 값으로 될 것이다. 즉, 전장 벡터가 대지로 향하는 방향이면 점전하는 정(+)-의 점전하이므로, 반대로 대지로부터 나가는 방향이면 부(-)의 점전하라는 것이다. 이 개념은 뇌운 전하에 의한 전장을 해석함에 있어 유용하게 이용될 것이다.

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

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

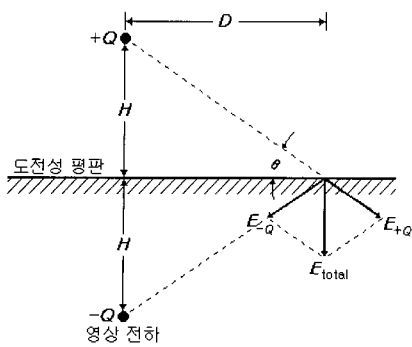


그림 2. 전장 계산을 위한 다이어그램
Fig. 2. Diagram for calculation of the electric field

각각의 전하에 의한 전장 벡터는 서로 다른 방향으로 형성되므로, 총 전장은 벡터의 합으로 얻어진다. 전장은 평판에 평행한 성분과 수직 성분으로 분해될 수 있다. 수평 성분의 전장은 크기는 같고 방향이 반대이므로 서로 상쇄되어 도전성 평판에서 수평 전장은 존재하지 않는다. 즉, 임의의 도전성 평판에서는 항상 표면에 수직인 전장만이 존재하고, 총 전장의 세기는 두 수직 성분의 합으로 식(3)과 같이 표현된다.

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

이 전장은 평판에 수직 방향이고 정(+)의 값이다.

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

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

가 되고, D 의 모든 값에 대하여 부(-)의 값이다. 또한 구름에서 대지까지의 고도가 H_P 이고, Q_P [C]의 전하량을 가지는 정(+)전하에 의한 방전이 발생할 때, D 의 거리에서 측정되는 정전장의 변화는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, D 의 모든

값에 대하여 정(+)의 값을 갖는다.

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

이와 같이 뇌운에 의한 대지전장의 변화는 구름 내의 전하분포와 이동에 대한 정보를 포함하고 있어 대지에서 전장의 세기를 관측하는 것에 의해 뇌경보가 가능하다.

2.2 뇌경보시스템의 구성

낙뢰의 가능성이 있는 뇌운의 접근에 따라 대지전장의 세기가 변화하므로 대지전장의 변화를 상시 관측함으로써 뇌운의 접근 및 낙뢰의 발생을 예측할 수 있다. 현재까지 대지전장을 측정하는 방법으로는 침단 코로나 방식, 평판형 안테나를 이용한 측정방법 및 필드 밀을 이용한 방법으로 크게 구분할 수 있다.

침단 코로나 방식은 구성이 간단하고 침단의 절연을 높이지 않아도 된다는 장점이 있어 수면상에 존재하는 전장의 측정에도 널리 활용되고 있다. 그러나 이 방법은 1~2 [kV/m] 이하의 전장은 측정할 수 없고, 침단 부식에 의해 측정 오차를 유발하는 등의 단점을 갖고 있어 저전장 영역이나 다습한 기후에서의 전장 측정에는 부적합하다.

용량성 평판 안테나를 이용하는 방법은 주파수 대역이 0.1 ~ 수 [kHz]인 저역 안테나와 수 백 [Hz] ~ 수 [MHz]의 주파수 대역을 갖는 고역 안테나로 분류할 수 있다.

저역 안테나는 뇌방전에 관한 파라미터의 수집 및 해석이나 기타의 방법으로 관측된 기록과의 관련성을 알기 위한 목적으로 사용되고, 고역 안테나는 주로 운내에 있어서의 뇌방전 개시부터 낙뢰까지의 전장 변화를 관측하기 위해 사용되고 있다. 평판 안테나를 이용하는 방식은 평판에 유기되는 전하를 측정함으로써 간단하게 전장의 세기를 구할 수 있지만, 계측 장비의 부피가 크고, 설치상의 어려움이 있으며 정전장을 측정할 수 없다.

필드 밀을 이용한 전장 측정 장치는 정전장은 물론 아주 느린 전장 변화를 측정할 수 있으며 감도가 우수하기 때문에 지표면에서의 대지전장 뿐만 아니라, 기구나 비행선상에서의 전장 측정도 가능하다. 필드 밀은 원통형(Cylindrical type)

과 회전형(Rotation type)의 두 가지 형태가 있으며, 원통형은 대기중 전장 측정에 주로 사용되고, 회전형은 지표면에서의 대지전장을 측정하는데 사용된다^[6~8].

본 연구에서는 대지전장 측정에 가장 적합한 회전형 필드 밀을 이용한 대지전장 측정장치를 설계·제작하였다^[9].

필드 밀을 이용한 전장 측정은 일정한 면적의 도체 표면에 유기되는 전하량을 측정하여 입사되는 전장을 측정하는 방법의 일종으로써, 인위적으로 입사 전장을 변화시킨다는 주요한 특징을 갖고 있다. 입사되는 전장을 변화시키기 위해서는 도체 표면을 노출/차폐시키기 위한 기계적인 장치가 필요하기 때문에 입력 전압이 DC 5.6 [V] 인 1,800 [rpm]의 직류 전동기를 이용하였다. 본 연구에서 설계·제작한 필드 밀의 사양과 개략도를 표 1과 그림 3에 각각 나타내었으며, 회전전극과 고정전극은 도전성과 가공성이 우수한 알루미늄판을 사용하였다.

표 1. 필드 밀의 사양

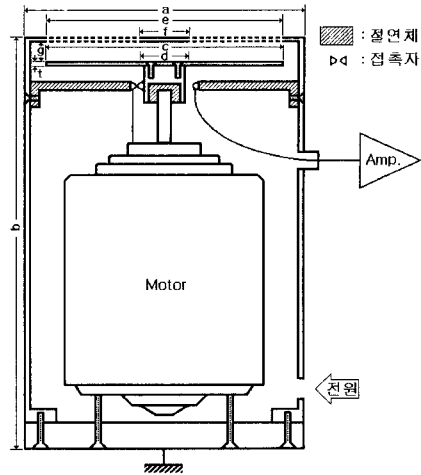
Table 1. Specification of the field mill

구 분	기호	치 수 [mm]
외 함 직경	a	110
외 함 높이	b	190
회전전극 직경(외부)	c	94
" (내부)	d	24
고정전극 직경(외부)	e	92
" (내부)	f	25
전극 간 겹	g	3.5
전극 두께	t	1.5

제작된 필드밀의 출력전압은 식 (6)과 같으며, 회전전극의 총면적에 비례하고 정전용량 C_0 에 반비례함을 알 수 있다^[9].

$$V = \frac{\epsilon_0 E_0 S}{C_0} \quad [V] \quad (6)$$

필드 밀로부터 얻어진 신호는 동축케이블 (RG-58A/U)을 통해 임피던스 변환기로 입력되며, 임피던스 변환기의 신호는 수 십 [mV]로 대단히 작기 때문에 최대 증폭도 40 [dB]의 증폭회로에 의해 수 [V]의 신호로 증폭된다.



(a) 필드 밀의 개략도



(b) 필드 밀의 사진

그림 3. 회전형 필드 밀의 구조

Fig. 3. Configuration of the rotation type field mill

임피던스 변환기 및 증폭회로는 그림 4와 같이 구성되며, 임피던스 변환기로는 입력 임피던스가 $1.5 \times 10^{12} [\Omega]$ 인 연산증폭기 CA3130를 사용하였으며, 이것을 지난 미소 전위를 증폭하기 위하여 고감도의 연산증폭기 OP-77을 사용하였다.

또한 필드 밀의 신호는 수 ~ 수 십 [mV]로 대단히 작기 때문에 외부의 전자파 및 노이즈에 대한 영향을 받기 쉬우므로 외부 노이즈에 의한 측정 전장 신호의 오차를 줄이기 위하여 전장 검출

부를 제외한 모든 회로는 차폐구조로 하였다.

증폭기의 출력신호는 그림 5와 같이 A/D 변환기를 통해 뇌경보시스템에 입력된다. 뇌경보시스템은 마이크로프로세서(MPU)에 의해 구성되는데 MPU에서는 LCD 창을 통하여 측정된 전장 신호를 디지털 값으로 표시하고, 설정값 이상으로 되면 뇌경보가 발생하도록 구성하였다.

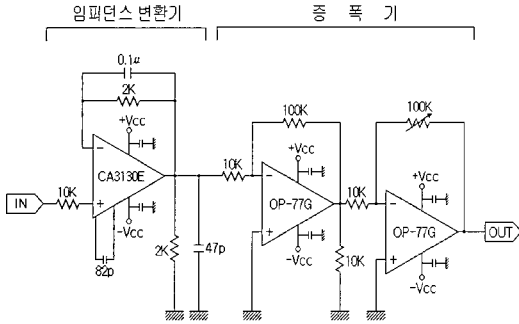


그림 4. 임피던스 변환회로 및 증폭회로
Fig. 4. Circuit of the impedance converter and amplifier

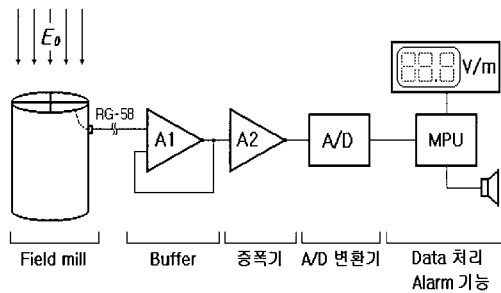


그림 5. 뇌경보시스템의 구성
Fig. 5. Configuration of the LWS

MPU 모듈은 총 8개의 아날로그 입력을 가지므로 여러 대의 대지전장 측정장치의 접속이 가능하고, 개개의 측정장치로부터 얻어진 전장 신호를 한꺼번에 처리할 수 있기 때문에 다수개의 측정시스템을 설치시 뇌운에 대한 뇌경보 뿐만 아니라 뇌운의 이동경로의 추정도 가능하다. 뇌운에 대한 정보 동작으로는 경보 등급을 4단계로 나누어 각각의 레벨에 대하여 LCD 창을 통해 표시되며, 전장 측정장치로부터 측정된 대지전장의 변화가 3단계 레벨이상으로 되면 즉각 경보를 울리도록 설계하였다.

3. 교정실험방법

교정실험장치는 교정용 전극계와 외부 노이즈에 의한 전장의 왜곡이 없는 평등전장을 얻을 수 있도록 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계로 구성하여 특성을 비교하였다^{[10],[11]}.

시제작한 뇌경보장치의 주파수 대역과 응답감을 측정하기 위하여 최대출력전압이 15[V]인 함수발생기(FG-2002C, LG)와 직류고전압 발생장치(MHV 12.0~1.5[kV], Bellnix)를 사용하였으며, 본 연구에 사용된 교정실험계의 개략도와 사진을 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다.

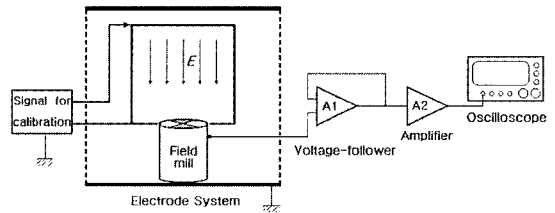
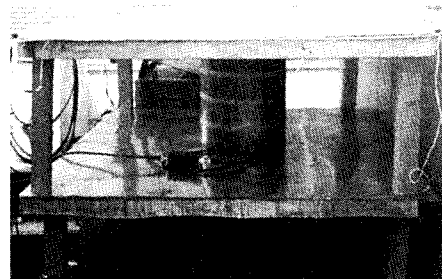
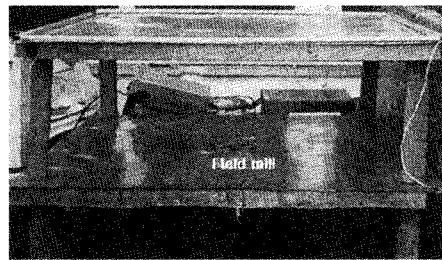


그림 6. 교정실험장치의 개략도
Fig. 6. Schematic diagram of the experimental apparatus for calibration



(a) 원통형 가드전극계



(b) 평행평판형 전극계

그림 7. 교정실험장치의 사진
Fig. 7. Photographs of the experimental apparatus for calibration

4. 실험결과 및 고찰

교정실험장치를 이용하여 측정한 결과로써 뇌경보시스템의 주파수 대역과 측정감도에 대하여 기술하였으며, 대지전장 측정에 의한 뇌경보시스템의 감지 능력에 대하여 고찰하였다.

4.1 주파수 대역 및 응답감도

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

그림 8은 뇌경보시스템의 주파수 응답특성을 나타낸 것으로 -3 [dB]의 상한 주파수는 약 200 [Hz]로 평가되었다. 따라서 본 뇌경보시스템은 35 [Hz] 이하의 주파수를 갖는 전장의 입사에 대해 감쇠없는 정확한 값을 나타내지만 60 [Hz]의 교류 전장에 대해서는 6 [%] 감소한 값을 나타낸다. 그러나 뇌경보시스템은 뇌운에 의해 형성된 전장을 대지에서 관측함으로써 낙뢰를 예지하기 위한 것으로 여러 관측자료에 따르면 뇌운의 변화는 정전장에서 수 [Hz] 이하로 보고되고 있으므로^{[3],[5]}, 본 연구에서 제작한 뇌경보시스템은 뇌운에 의한 대지전장의 측정에 적합함을 알 수 있다.

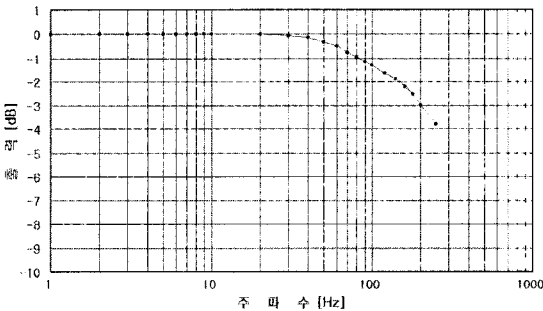


그림 8. 뇌경보시스템의 주파수 특성
Fig. 8. Frequency characteristics of the LWS

그림 9는 뇌경보시스템의 응답특성으로, 원통형 가드전극계와 평행평판 전극계에 직류전압을 인가하여 형성된 전장의 세기와 뇌경보시스템의 출력전압을 나타낸 것이다.

필드 밀에 입사되는 전장의 세기를 100[V/m]에서 1 [kV/m]까지 변화시켰으며, 이에 대한 뇌경보시스템의 출력전압은 그림 9와 같이 선형적인 특성을 나타내었다.

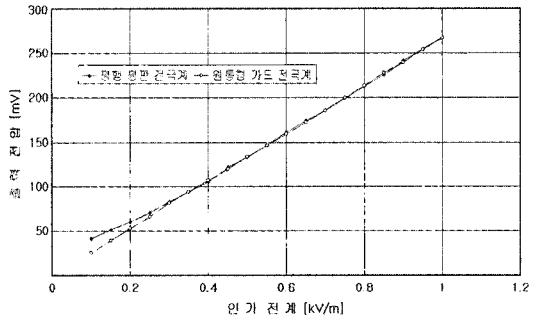


그림 9. 입사전장에 대한 뇌경보시스템의 특성
Fig. 9. Characteristics of the LWS to the applied electric field

300 [V/m] 이하의 전장에서는 두 교정장치에 의한 결과가 약간의 오차를 나타내는데, 이것은 평행평판 전극계의 경우 외부 입사전장에 영향을 받기 때문이다.

실험결과로부터 본 뇌경보시스템의 응답감도는 100 [V/m]의 전장입력에서 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 최대 분해능은 73 [V/m]가 된다.

4.2 뇌경보 능력에 대한 이론적 고찰

본 연구에서 제작한 뇌경보시스템의 뇌운감지 능력은 뇌운의 모델로부터 이론적인 해석이 가능하다. 그림 1의 뇌운 모델에서 수직으로 위치한 정(+)의 전기 쌍극자 일부분을 파괴하는 운내 방전에 의해 거리 D인 대지에서의 정전장 변화는 $Q_N = Q_P = Q$ 로 놓고, 식 (4)와 식 (5)를 합하면, 다음의 식 (7)이 얻어진다.

$$E_{PN} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{H_P}{(H_P^2 + D^2)^{3/2}} - \frac{H_N}{(H_N^2 + D^2)^{3/2}} \right] \text{ [V/m]} \quad (7)$$

여기서, 전장의 변화는 D 가 증가하면서 부호가 반전되게 되므로, 가까운 거리에서의 전장 변화는 부(-)로, 먼 거리에서의 전장 변화는 정(+)으로 된다.

그림 10에 식 (7)을 이용하여 뇌운 중심까지의 수평거리에 따른 전장의 세기를 나타내었다.

그림 10은 뇌운이 20 [km]의 거리에서 점차적으로 접근하는 경우의 전장 변화를 나타내었다.

뇌운 중에 포함된 전하의 평균값은 10~50 [C] 범위이며^[3], 식 (7)에서 $Q=30$ [C]으로 되므로 H_N, H_P 에 각각 임의의 수치를 대입하고, 대지 전장 E 와 거리 D 와의 관계를 계산하면 그림 10의 a, b, c, d 와 같다. 그림에서 대지전장의 세기는 극성 반전 후에 급격히 높아지고, 뇌경보시스템이 동작하기에 충분한 값까지 상승함을 알 수 있다. 극성이 반전되는 지점의 거리 D_0 는 뇌운이 가진 전하량 Q 에 무관하고, 뇌운 전하의 높이에 의존한다. 집중전하의 위치가 똑같은 그림 중의 곡선 a, b, c 에서 살펴보면 D_0 는 8~10 [km]가 됨을 알 수 있다.

또한 뇌경보시스템의 최대 분해능이 73 [V/m]이고, 이 전장값에 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 약 6 [km] 이내로 접근하는 모든 뇌운의 감지와 이동상태를 분석할 수 있다.

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

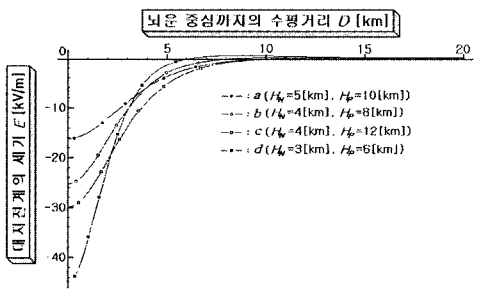
5. 결 론

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

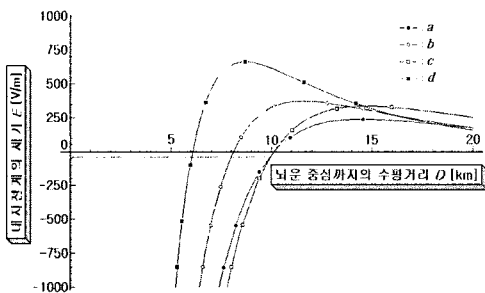
1. 회전형 필드 밀을 이용하여 정전장 영역의 전장 측정이 가능하였으며, -3 [dB]의 상한 주파수가 200 [Hz] 이므로 뇌운 접근시의 전장변화 측정에 충분히 적용 가능함을 확인하였다.
2. 본 연구에서 제작한 필드밀의 최대 감도는 0.267 [mV/V/m]로 인가전장에 비례하는 선형적인 응답을 나타내었으며, 뇌경보시스템의 최대 분해능은 73 [V/m]이었다.
3. 뇌경보시스템의 뇌운감지능력을 이론적으로 산출한 결과, 자연 현상에서 발생 가능한 뇌운의 모델인 경우, 6 [km] 이내로 접근한 모든 뇌운에 대한 감지능력이 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 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.



(a) 전체도



(b) 확대도

그림 10. 뇌운에 의한 대지전장의 변화
Fig. 10. Changes of the electric field intensity caused by a thundercloud

- [2] J. N. Chubb, "The Calibration of Electrostatic Field meters and the Interpretation of their Observations", Electrostatics '87, Inst. Phys. Conf. Series, No. 85, pp. 261~266, 1987.
- [3] M. A. Uman, "Lightning", Dover Publications Inc., New York, pp. 1~113, 1982.
- [4] M. A. Uman, "Natural Lightning", IEEE Trans. Ins. Appl., Vol. 30, No. 3, pp. 785~790, 1994.
- [5] 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.
- [6] S. G. Gathman, "A Field mill for Tethered Balloons", Rev. Sci. Instrum., Vol. 43, No. 12, pp. 1751~1754, 1972.
- [7] 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.
- [8] R. C. Waddel, "An Electric Field Meter for Use on Airplanes", Rev. Sci. Instrum., Vol. 19, No. 1, pp. 31~35, 1948.
- [9] 천상규, 송재용, 길경석, "대지전계 측정용 Field Mill 개발에 관한 연구", 한국해양대학교부설 산업기술연구소 논문집 제18집, pp. 55~66, 2001.1
- [10] 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.
- [11] 길경석, 송재용, 김일권, "휴대용 극저주파 전장측정기 개발", 한국센서학회지, Vol. 9, No. 2, pp.120~126, 2000.

著 者 紹 介

길 경 석

1962년 6월 30일생.
 1984년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1987년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
 1996년 4월~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 조교수

김 점 식

1973년 1월 11일생.
 1995년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1997년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
 현재 한국전기연구원 전기환경·송전그룹 연구원
 2000년 3월~현재 한국해양대학교 전기공학과 박사과정

이 성 근

1959년 1월 20일생.
 1983년 2월 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사)
 1990년 8월 동 대학원 기관공학과 졸업(공학석사)
 1998년 2월 동 대학원 기관공학과 졸업(공학박사)
 1992년-1998년 대덕대학 제어계측과 교수
 1998년 9월~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 조교수

권 장 우

1968년 4월 15일생.
 1990년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1992년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1996년 8월 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
 1996년-1998년 특허청 심사관
 1998년 3월~현재 동명정보대학교 컴퓨터공학과 조교수

송 재 용

1975년 1월 28일생
 1997년 2월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
 현재 신동아전기 부설 기술연구소 연구원
 1999년 3월~현재 한국해양대학교 전기공학과 박사과정