

신개념 뇌경보 시스템 개발

(Development of a New-Concept Lightning Warning System)

최수연* · 박찬용 · 길경석 · 안창환 · 이영근

(Su-Yeon Choi · Chan Yong Park · Gyung-Suk Kil · Chang-Hwan Ahn · Young-Kun Lee)

Abstract

This paper described a New-Concept lightning warning system(LWS) which can measure electric field intensity on the ground level by an electric field mill (EFM) and calculate the lightning location by radiated electro-magnetic waveform. The EFM measures electric field up to 20 [kV/m] with the sensitivity of 0.15 [V/kV/m] and frequency bandwidth of the loop antenna was ranges from 5.2 [kHz] to 1.71 [MHz]. The LWS provides data on the movements of thunderclouds and the possibility of lightning return stroke.

1. 서론

최근 지구온난화로 인한 기상이변들이 속출하고 있는데 그 중 하나가 빈번한 낙뢰발생이다[1]. 낙뢰는 대기의 불안정으로 인한 국부적인 뇌운의 형성에 의해 발생하는 것으로, 이로 인한 피해가 증가하고 있다. 낙뢰피해에 대한 대응책으로 피뢰침이나 서지방호장치와 같은 피뢰설비가 적용되고 있으나, 100 [%] 보호가 되지 못하여 인적·물적 피해가 끊임없이 보고되고 있다[2].

낙뢰에 대한 피해를 줄이기 위한 부가적 방법은 낙뢰의 발생을 사전에 알고 대처하는 것으로, 이를 위해 뇌경보 시스템이 이용된다. 뇌경보 시스템은 전력설비의 관리, 항공기의 이착륙, 우주선 발사, 야외활동에서 안전을 확보하는 등 다양한 분야에 능동적으로 활용되고 있다[3].

뇌경보를 위한 감지 파라미터로는 대지전계의 세기와 뇌방전에 의한 방사전자파 등이 있으며, 대부분의 뇌경보는 대지전계의 세기만을 관측하는 방식이다. 또한 기상예보와 특정목적으로 사용되는 기상용 초단파레이더, LLP(Lightning Location and Protection), LPATS(Lightning Positioning and Tracking System) 및 IMPACT(Improved Accuracy from Combined technology)와 같은 고가 장비들은 국가적 차원에서 활용되고 생활환경에는 실질적 적용이 불가능한 실정이다[4].

따라서 본 연구에서는 일상환경의 국지적인 기후변화에도 민감하게 대처하여 낙뢰의 발생을 경보할 수 있고, 한 지점에서 뇌방전 위치를 표정

할 수 있는 뇌경보 시스템을 개발하는 것에 목적을 두었다.

2. 시스템 구성

본 연구에서 개발한 뇌경보 시스템의 구성은 그림 1과 같으며 EFM(Electric Field Mill), 뇌방전 감지부, 신호처리회로, 데이터 송수신부 및 경보장치로 구성된다.

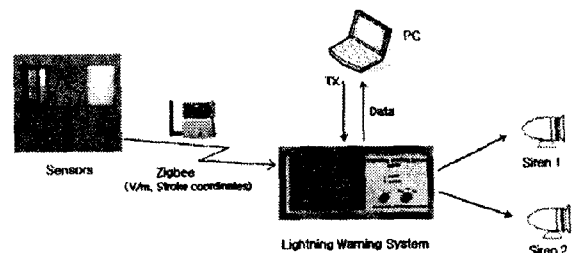


그림 1. 뇌경보 시스템의 구성

Fig. 1. Configuration of the Lightning Warning System

EFM은 대지전계를 측정하여 뇌운의 접근 및 크기를, 전자계센서로 구성된 뇌방전 감지부는 전자계 변화를 측정하여 뇌방전 발생위치를 추정한다. 각각의 센서를 통해 감지된 신호는 신호처리회로를 통해 데이터화되며 송수신회로를 통하여 무선통신방식(IEEE 802.15.4)으로 경보장치에 전송된다. 경보장치에서는 수집된 데이터를 화면에 게시하고 뇌경보 알고리즘에 따라 경보신호를 출력한다. 또한 PC와 연계하여 경보장치에 수신된 데이터를 저장하고 분석할 수 있도록 설계하였다.

2.1. EFM (Electric Field Mill)

본 연구에서는 정전계 및 아주 느린 전계 측정에 용이하고 감도가 우수하여 지상에서 대기전계의 측정에 적합한 평면 셔터형 필드밀을 설계·제작하였으며, 구성은 그림 2와 같다.

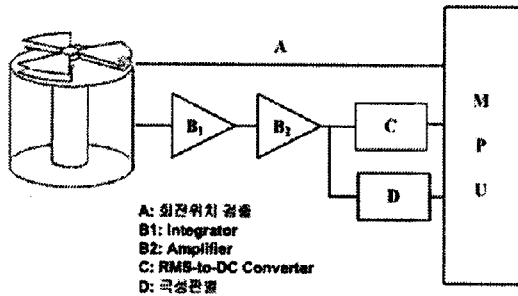


그림 2. EFM의 구성
Fig. 2. Configuration of the EFM

EFM은 고정된 센서전극과 접지된 차폐전극으로 구성되며 각각의 전극은 6개의 날개를 갖는 구조이다. 차폐전극은 직류전동기의 축에 연결되어 회전함으로써 센서전극에 입사되는 전계에 대해 노출과 차폐를 반복한다. 고정전극의 가장자리에는 포토 인터럽터(photo-interrupter)를 설치하여 회전하는 차폐전극의 위치를 검출하도록 하였다. 전계 입사 후 센서전극이 차폐전극에 의해 차폐되면 축적된 전하는 임피던스를 통해 전달되며, 정전계하에서 유도된 전하는

$$q = \int \bar{D} d\bar{A} = \epsilon_0 EA \quad [C] \quad (1)$$

이 되고, $(\omega RC)^2 \gg 1$ 인 조건에서 임피던스 양단의 전압 v_h 는

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

가 되어 입사전계의 세기에 비례한다[5]. 센서전극에 검출된 신호는 시간에 대한 미분 값이므로 적분회로를 통해 값을 보상해주고 증폭하여 정류시켰다. 정류된 전압은 실효값으로 MPU에 입력되고, 교정실험을 통해 구한 환산식으로 전계값을 산출한다. 또한 정류되어 나온 전압은 트리거 회로를 통해 정전계의 극성을 판별하도록 하였다.

시제작 필드밀 센서전극 출력에 접속되는 버퍼 증폭기의 입력저항은 100 [MΩ], 입력 정전용량은 100 [nF]이며, 차폐전극 회전용 전동기의 회전수는

2000 [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 정전차폐하여 측정의 안정도를 향상시켰다.

EFM의 감도를 산출하기 위하여 입사된 전계에 대한 EFM 출력전압을 측정하는 교정실험을 수행하였다. 전계의 왜곡이 일어나지 않도록 가장자리를 등글게 처리한 직경 500 [mm]의 원형 동판을 상하부에 설치하고 하부원판의 중앙에 필드밀을 고정시켰다. 상부 원판과 필드밀의 센서전극간의 간격을 60 [mm]로 고정시키고 10 [kV] 직류고전압 발생장치를 이용하여 상부원판에 전압을 인가하여 정전계를 형성시킨 후, 전계 입력에 대한 필드밀의 출력전압을 평가하였다. 교정실험 결과, 필드밀의 감도는 0.15 [V/kV/m]이고, 0.5~20 [kV/m]범위의 입사전계에서 선형적인 특성을 가졌다.

2.2. 뇌방전 감지부

낙뢰는 뇌운이 가진 전하를 공기절연파괴를 통해 대지로 방출하는 현상으로 이 과정에서 전자계가 발생하여 대기중을 전파하게 된다[6]. 본 연구에서는 뇌 방전 감지부로 전계검출을 위한 Whip 안테나와 자계검출을 위한 Loop안테나로 구성된 전자계 센서를 설계하였다. Loop안테나의 동작원리는 다음의 맥스웰 방정식(Maxwell equation)을 기초로 한다[7].

$$\int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

\mathbf{E} : 전계의 세기, $d\mathbf{L}$: 루프의 미소길이,
 \mathbf{B} : 자속 밀도, $d\mathbf{A}$: 미소면적,
 Φ : 루프를 통과하는 전자속

패러데이의 법칙에 의해 Loop 안테나에 유기되는 전압 V 는

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

가 되므로, 낙뢰 시 발생하는 자계파형을 검출할 수 있다. Whip 안테나 회로의 공진주파수는 300 [kHz]이며, Loop안테나의 주파수특성은 -3 [dB]에서 5.2 [kHz]~1.71 [MHz]로 낙뢰 시의 전자계 파형을 측정하기에 충분한 특성을 갖는다.

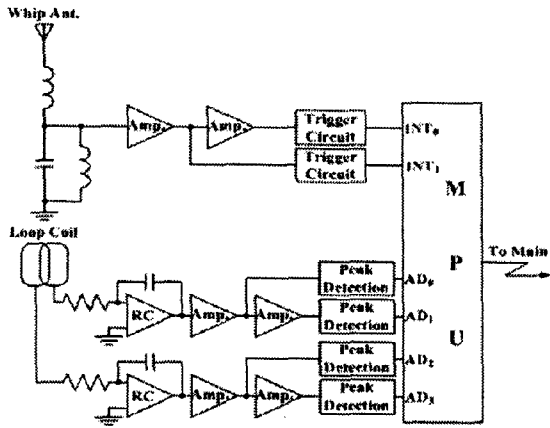


그림 3. 뇌방전 검출회로
Fig. 3. Lightning detection circuit

낙뢰의 위치를 추정하기 위해 whip 안테나와 직교 Loop안테나로 구성된 뇌방전 검출회로는 그림 3과 같으며 뇌방전 위치표정 알고리즘을 표 1에 나타내었다.

표 1. 뇌방전 위치표정 알고리즘
Table 1. Algorithm of Lightning Positioning

Loop 안테나 :자장파형	$\int_L E \cdot dL = - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dA = - \frac{d\Phi}{dt}$ $V = - \frac{d\Phi}{dt}$	
Whip 안테나 :극성 판별	정극성 입력시 : INT0 부극성 입력시 : INT1	
	Case INT0	Case INT1
사분면	AD0>AD1 & AD2>AD3: 1 AD0>AD1 & AD2<AD3: 2 AD0<AD1 & AD2<AD3: 3 AD0<AD1 & AD2>AD3: 4	AD0<AD1 & AD2<AD3: 1 AD0<AD1 & AD2>AD3: 2 AD0>AD1 & AD2>AD3: 3 AD0>AD1 & AD2<AD3: 4
방위각	$\theta_{1/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_0}$ $\theta_{2/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_0}$ $\theta_{3/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_1}$ $\theta_{4/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_1}$	$\theta_{1/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_1}$ $\theta_{2/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_1}$ $\theta_{3/4} = \tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_0}$ $\theta_{4/4} = \tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_0}$
거리	$E = \frac{[M]}{4\pi\epsilon_0 D^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c D^2} \cdot \frac{dM}{dt} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 D} \cdot \frac{d^2 M}{dt^2}$ $B = \frac{\mu_0}{4\pi D^2} \cdot \frac{dM}{dt} + \frac{\mu_0}{4\pi c D} \cdot \frac{d^2 M}{dt^2}$	

낙뢰에 의해 발생되는 전자계는 무지향성 whip 안테나에 의해 트리거 되어 전계파형의 극성이 판별되며, 루프코일은 자계파형의 크기와 폭을 검출

한다. 검출된 신호는 MPU에 입력되어 낙뢰의 극성, 사분면, x축으로부터의 각도, 거리정보를 산출하여 낙뢰의 발생점을 추정한다[8].

2.3. 경보장치

EFM과 뇌방전 감지부를 통해 측정된 신호가 신호처리회로를 거쳐 무선통신으로 경보장치에 수신되면 경보를 위한 데이터 관리가 필요하다. 본 연구에서는 데이터를 뇌경보 제어, 실시간 모니터링, 시스템 진단에 적용할 수 있도록 경보장치의 시퀀스를 설계하였다. 뇌경보 알고리즘은 표 2와 같이 지속시간에 대한 대지전계의 강도와 일정반경내의 뇌격발생을 파라미터로 하여, 낙뢰발생 가능성을 Normal, Warning, Alert의 세 단계로 구분한다. 또한 10분 동안 25 [km]내에 낙뢰발생이 없고, 지속시간에 대한 대지전계의 강도가 일정레벨에 도달하면 위험단계에서 해제된다.

표 2. 뇌경보 알고리즘
Table 2. Algorithm of Lightning warning

Status Change	전계의 세기[V/m]			지속시간
	High	Std.	Low	
Warning	4000	3000	1000	5m
	4500	3500	1200	3m
	5000	4000	1500	0
	10~25 [km] 반경 내 낙뢰발생			0
alert	5000	4000	1500	3m
	8000	5000	2000	20s
	9000	7000	2200	0
	10 [km] 반경 내 낙뢰발생			0
Alert to Warning	4000	3000	1500	5m
Alert or Warning to Normal	1000	1000	1000	10m
	25 [km] 반경 내 낙뢰발생 없을 시			10m

실시간 모니터링은 그림 4와 같이 대지전계의 값과 변화를 수치 및 바그래프를 통해 나타내며, 60 [km]내에 생성되는 낙뢰점의 위치를 좌표 상에 표시하도록 하였다. 시스템 진단에서는 경보장치의 전원, 원격지의 EFM동작 및 통신 상태를 지속적으로 체크하고 이상 시에 LED 및 경보음 등을 통하여 시스템 이상과 그 항목을 나타내도록 하였다. 또한 지속적인 데이터 축적을 위해 PC와의 연계가 가능하도록 하여 데이터 분석에 있어서도 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

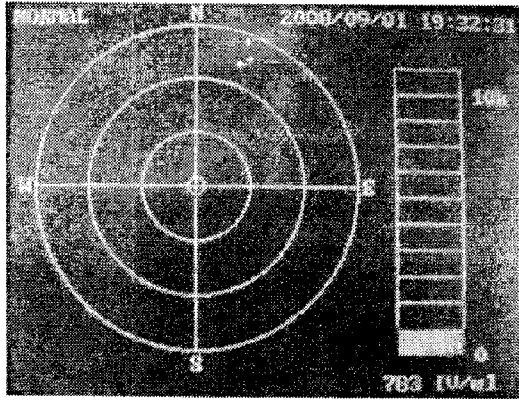


그림 4. 주 제어장치의 화면
 Fig. 4. Display of console

3. 결론

대지전계의 세기와 일정반경 내의 낙뢰발생을 실시간으로 모니터링하고 경보할 수 있는 시스템을 개발하였다.

낙뢰의 발생을 예측하기 위한 파라미터는 대지전계와 방사전자계로, 본 연구에서는 EFM과 Whip 및 Loop 안테나 회로로 검출하였다. EFM은 0.15 [V/kV/m]의 감도로 0.5 [kV/m]~20 [kV/m]의 범위에서 대지전계의 선형적인 측정이 가능하다. 방사전자계 검출회로인 Whip 안테나의 공진주파수는 300 [kHz]이며, Loop 안테나의 주파수대역은 5.2 [kHz]~1.71 [kHz]이다. 또한 방사전자계 파형으로부터 한 지점에서 낙뢰의 위치를 표정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

향후에는 본 연구결과를 이용하여 웹기반 광역 뇌경보 시스템을 구축하고자 한다.

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

참고 문헌

- [1] Colin Price, David Rind, "Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies", *Journal of geophysical research*, vol.99, No. D5, pp.10,823~10,831, 1994.
- [2] 이기홍, 서만선, 이택섭, "국제규격과 부합된 공동주택 피뢰설비 표준 설계모델 개발", 한국건설기술연구원 보고서 2004.
- [3] Zen-Ichiro Kawasaki, "Dependency of VHF broadband Lightning source mapping on Fourier Spectra", *Geophysical Research Letters*, Vol.27, No.18, pp.2917~2920, 2000.
- [4] 기상청, "낙뢰연보 2007", pp.12~20, 2007.
- [5] Mazen Abdel-Salam, et al., *High-Voltage Engineering*, 2nd Edition, Marcel Dekker, INC., pp. 596~597, 2000.
- [6] Gerhard Diendorfer, Wolfgang Schultz, and V. A. Rakov,

- "Lightning Characteristics Based on Data from the Austrian Lightning Locating System", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol.40, No.4, 1998.
- [7] William H. Hayt, "Engineering Electromagnetic", pp.403~427, 2001.
 - [8] 길경석, 박대원, 김일권, 최수연, 안창환, 이영근, "뇌방전 위치표정에 관한 연구(1)", *조명'전기설비학회논문지*, 제21권, 제10호, pp.1~8, 2007.