



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



工學碩士 學位論文

필드밀과 루프안테나를 이용한
뇌경보시스템 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Lightning Warning System
Using a Field Mill and a Loop Antenna



指導教授 吉 曜 碩

2009年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

崔 秀 淵

本 論文을 崔琇淵의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 金 潤 植 ㊞

委 員 : 工學博士 吉 曜 碩 ㊞

委 員 : 工學博士 張 樂 元 ㊞



2008年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

崔 瑛 淵

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이 론	4
2.1 뇌방전 현상	4
2.2 대지전계 측정	10
2.3 뇌방전 위치표정	14
제 3 장 설계 및 제작	16
3.1 대지전계 측정장치	17
3.2 방사자계 측정장치	20
3.3 경보장치	29
제 4 장 평가 및 분석	35

4.1 대지전계 측정장치	35
4.2 방사자계 측정장치	39
4.3 뇌운 감지범위의 이론적 고찰	44
제 5장 결 론	48
참 고 문 헌	49



그림 및 표 목차

<그림목차>

그림 1.1 최근 6년간 국내 낙뢰횟수	1
그림 2.1 뇌운크기의 비교	4
그림 2.2 전형적인 뇌운의 모델	6
그림 2.3 낙뢰의 진전 메카니즘	7
그림 2.4 스텝리더의 개시와 전파	9
그림 2.5 전기영상법에 의한 전계 계산 모델	10
그림 2.6 LLP의 원리	14
그림 2.7 LPATS의 원리	15
그림 3.1 뇌경보시스템의 구성	16
그림 3.2 EFM의 구성	17
그림 3.3 EFM 사진	19
그림 3.4 투프코일의 전기적 등가회로	21
그림 3.5 전자계 검출회로	23
그림 3.6 투프회로 사진	26
그림 3.7 거리에 따른 방사자계의 변화	26
그림 3.8 경보장치의 구성	29
그림 3.9 경보장치의 운전	31
그림 3.10 뇌경보 시퀀스	33
그림 4.1 교정계의 구성	35
그림 4.2 EFM 출력 특성	36
그림 4.3 대지전계의 측정	38
그림 4.4 자계 검출회로의 주파수 응답	39

그림 4.5 자계파형의 예	40
그림 4.6 자계파형의 최대값 및 영점시간 측정	41
그림 4.7 전계에 의한 트리거 예	42
그림 4.8 화면출력의 예	43
그림 4.9 뇌운고도에 따른 전계세기의 변화	45
그림 4.10 뇌운전하량에 따른 전계세기의 변화	46

<표목차>

표 3.1 뇌방전 위치표정 알고리즘	25
표 3.2 뇌경보 레벨	32
표 4.1 H_N 과 H_P 의 모델	44



A Study on the Development of a Lightning Warning System Using a Field Mill and a Loop Antenna

by Su - Yeon, Choi

Department of Electrical & Electronics Engineering
The Graduate School of Korea Maritime University
Busan, Republic of Korea



Abstract

This thesis deals with the development of a lightning warning system which can predict the possibility of lightning strike and the position of lightning discharge. Lightning warning system plays an important role in protecting human life and other facilities from lightning strikes. The system uses the electric field intensity at the ground as a parameter to warn the possibility of lightning strike. A planar-shutter type electric field mill (EFM) with a rotating-vanes is studied to measure the electric field intensity.

Calibration of the developed EFM was performed in a vertically

symmetrical arrangement which consists of two-parallel round plates to form homogeneous electrical fields. The sensitivity of the EFM was adjusted to 0.15 [V/kV/m], and this covers the ranges from 200 [V/m] to 20 [kV/m]. After the calibration, the field mill was installed on the roof of a building to measure the changes of electric field intensity caused by thunderclouds.

The position of lightning discharges is useful information to know the movement and the activity of thunderclouds. Electric field component produced by lightning discharge is detected by the configuration of a whip antenna and a narrow-band resonance amplifier with 300 [kHz] center frequency. Magnetic field waveform is detected by a crossed-loop coil and an integral amplifier. Frequency bandwidth of the circuit ranges from 5 [kHz] to 1.2 [MHz].

The polarity of lightning discharges is discriminated by electric field component. After fixing the polarity, we can calculate the direction and distance of lightning discharge by the peak and the zero-cross time of the detected magnetic field waveform.

From the field test on the ground, it was confirmed that the system has the good performance necessary for the measurement of electric field and the position of lightning discharges.

제 1 장 서 론

최근 지구온난화의 가속화로 이상기후들이 속출하고 있는데, 그 중 하나가 빈번한 낙뢰발생이다. NASA Goddard 연구소에서는 모의시험결과, 이산화탄소 농도가 2 배 증가할 때 지구 온도는 $4\sim 6 [^{\circ}\text{C}]$ 상승하고, $1 [^{\circ}\text{C}]$ 의 온도 상승 마다 낙뢰의 발생은 $5\sim 6 [\%]$ 증가할 것이라는 결과를 발표하였다^[1]. UNFCCC에 의하면 1994년 이후 이산화탄소의 농도는 전 지구적으로 매년 $1.9 [\text{ppm}]$ 씩 증가하고 있으므로 지금과 같은 속도로 대기중에 이산화탄소가 축적되면 온도상승으로 인한 낙뢰의 발생이 더욱 빈번해질 것으로 예상된다^[2]. 그림 1.1은 최근 6년 동안의 낙뢰 횟수를 나타낸 것으로, 2002~2007년까지 한반도의 평균낙뢰 횟수는 약 120만회로 격년증감 현상을 보이며 2007년에는 155만 여건까지 증가하고 있음을 보여준다^[3].

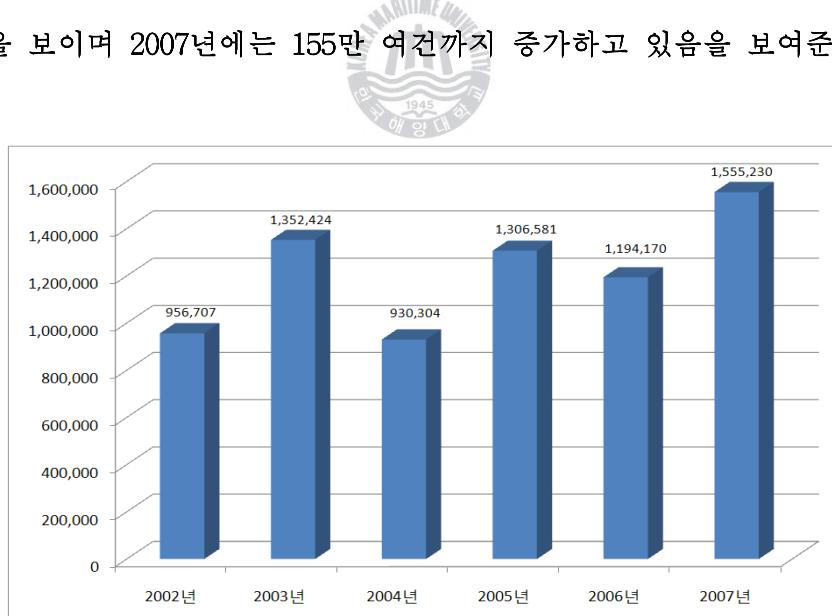


그림 1.1 최근 6년간 국내 낙뢰횟수

Fig. 1.1 The internal lightning numbers during last six years

낙뢰는 단순한 자연현상으로 그치는 것이 아니라 심각한 인적·물적 피해를 일으키는 원인으로 지상은 물론 항공기와 선박까지 광범위하게 작용한다. 다음은 이에 관한 몇 가지 기사 및 뉴스를 발췌한 것이다.

- 조업중 제주선적 39 [t]급 유자망어선 H호가 낙뢰로 기관고장을 일으켜 표류 (2006.6.20 제주일보)
- '낙뢰사고' 항공기에 리라초교생 170명 탑승 (2006.6.12 매일경제)
- 제주서 낙뢰사고로 해녀 3명 사상 (2006.6.30 CBS 노컷뉴스)
- 용헬봉 정상서 쉬던 30여명 동시 감전… K2서 숨진 동료 추모 산행 4 명 참변 (2007.7.30 한국일보)
- 반용마을에 낙뢰로 인한 정전사고가 발생. 각 가구의 TV 60 대와 보일러 12대 모두 고장(2007.8.9 연합뉴스: 울산)
- 진주 도로공사장 낙뢰 중국인 포함 6명 사상 (2007.8.23 부산일보)
- SK에너지, 원유저장탱크외벽 낙뢰 화재 (2008.7.30 아시아경제)
- 고리원전 1호기 낙뢰로 발전 중단 (2008.8.9 부산일보)

상기의 내용들은 낙뢰로 인한 다양한 피해의 양상들로, 낙뢰가 끼치는 인명에 대한 위협과 경제적 손실의 심각성을 보여주고 있다. 특히, 첨단화·네트워크화가 대중화 되고 여가활동이 증대되고 있는 근대사회에서의 피해 범위는 더욱 확대되고 있으며, 올해 10월 10일 이루어진 소방방재청에 대한 국정감사에서는 2004~2007년까지 4년간 낙뢰사상자가 3배 이상 증가하였고, 낙뢰로 인한 재산피해도 매년 증가하고 있는 것으로 보고된 바 있다.

특히 산악, 해변가, 평지 또는 야외의 개방된 넓은 지역에서의 낙뢰로부터의 위험은 피뢰장치로 대처하기 어려우며, 이러한 경우 사람이 능동적으로 대처하는 것이 합리적인 것으로, 이를 위해 낙뢰의 발생 가능성에 대한 정보가 필요하다. 현재 기상청의 예보시스템은 광역적인 정보제공과

안내를 목적한 것으로, 국지적인 범위에서 피해대처를 위해 이용하기는 어려운 실정이다. 그러므로 사전에 뇌운의 동향을 감시하여 낙뢰의 위험을 국지적으로 경보할 수 있는 뇌경보시스템이 필요하다^[4].

본 논문에서는 급증하는 낙뢰피해에 대한 대책의 일환으로 뇌경보시스템을 개발하였다. 경보파라미터로는 일정레벨이상의 대지전계의 세기가 지속되는 시간과 일정반경 내에 발생하는 뇌방전을 적용하였으며, 이를 위해 대지전계 측정장치 및 방사자계 측정장치를 설계 및 제작하였다. 또한 뇌운의 이동을 감시하기 위한 목적으로 뇌방전 위치표정 알고리즘을 개발하였다. 상기의 장치 및 알고리즘을 통해 산출한 데이터들은 최종적으로 뇌경보 제어 및 실시간 모니터링에 이용된다.



제 2 장 이 론

2.1 뇌방전 현상

뇌방전 현상은 대기 중에서 일어나는 파도 대전류를 흘리는 전기방전으로서 그 경로는 수 십 [km]이다. 일반적으로 뇌방전은 뇌운에 의해서 발생되나, 눈보라, 모래폭풍, 화산 폭발시 구름 위에서도 발생하며, 맑은 날씨에서 발생되는 경우도 있다. 뇌운의 높이는 보통 8~12 [km]이고, 크기는 20 [km]에 이르는 것도 있다.

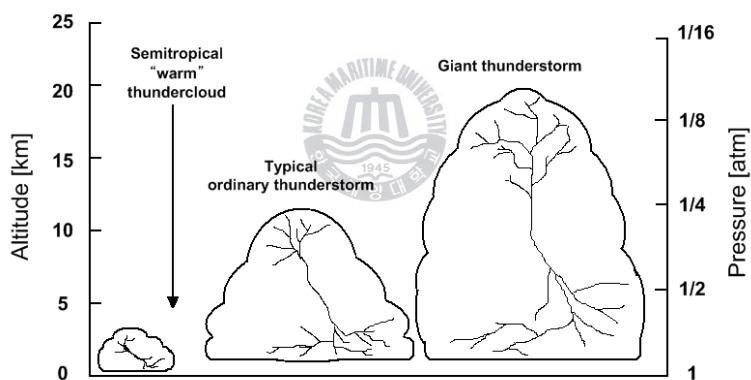


그림 2.1 뇌운크기의 비교

Fig. 2.1 Comparison of various sizes of thunderclouds

뇌방전은 번개와 천둥을 동반하는데, 번개는 뇌방전 시 내는 빛에너지이며, 천둥은 방전으로 인해 순간적인 공기의 절연파괴 시 발생하는 폭발음이다. 3 [kV/mm] 의 공기 절연내력을 파괴시켜 전로를 형성하기 위해서는 양쪽 전하 중심사이의 전위차가 수 천 kV ~수 십만 kV 에 이르러야 하고, 이때 수 cm의 직경을 갖는 공기의 채널을 경로로 방전이 일어나 순

시간에 온도는 $20,000\sim30,000 [^{\circ}\text{C}]$ 까지 상승한다. 갑작스런 공기의 가열은 폭발적인 팽창을 야기하여 천등을 일으키며, 일반적으로 천등이 들리는 범위는 $20 [\text{km}]$ 이다^{[3],[5]}.

2.1.1 놀운의 발생

놀운의 생성조건은 기본적으로 불안정한 대기, 상승작용, 높은 습도를 들 수가 있다. 이 세 가지 요인은 강한 상승기류를 만들고, 이 중 하나만이라도 충족되면 놀운의 생성이 가능해진다. 놀운은 생성되는 과정에 따라 크게 열뢰와 계뢰로 나눌 수 있으며, 열뢰는 여름에 강한 일사로 데워진 지표부근의 습한 공기가 상승기류를 형성하면서 만들어 진다. 놀운의 상부는 정전하, 하부는 부전하로 분포하고, 지상으로부터 $2\sim3 [\text{km}]$ 의 높이에서 발생한다. 계뢰의 경우 겨울철 온난전선과 한랭전선의 경계에서 강한 상승기류가 형성되어 지상 수 백 [m]의 비교적 낮은 곳에서 발생하여 넓은 지역에 영향을 미친다. 우리나라에서 발생하는 낙뢰의 $80\sim90 [\%]$ 이상은 열뢰로 인해 대지가 양전하로 대전되면서 방전되는 부극성 낙뢰에 속한다^[5].

2.1.2 놀방전 과정

놀방전 현상은 놀운과 대지사이에 방전하는 낙뢰(ground discharge)와 놀운 내부에서 방전이 일어나는 운내방전(intracloud discharge), 놀운과 놀운사이에서 일어나는 운간방전(intercloud discharge), 놀운과 주변 대기사이에서 일어나는 대기방전(air discharge)으로 나눈다.

그림 2.2에는 놀운의 전형적인 모형도를 나타냈다. 낙뢰는 이러한 형태의 놀운에 의한 방전의 각 세부적인 과정을 통해 놀운의 정(+)전하와 부(-)전하가 중성화되는 과정으로, 이 모든 방전을 플래쉬(flash)라고

한다. 플래쉬는 여러 가지 방전성분으로 구성되어 있으며, 지속시간은 대체로 0.01~2 [s] 정도로 보통 한 번의 플래쉬 안에 3~4회의 스트로크(strokes)가 발생하며 많게는 20회 이상까지 발생되기도 한다. 스트로크의 지속시간은 10~250 [μ s]이고, 진전속도는 $(0.2\sim1.6)\times10^8$ [m/s]이다^{[6]~[8]}.

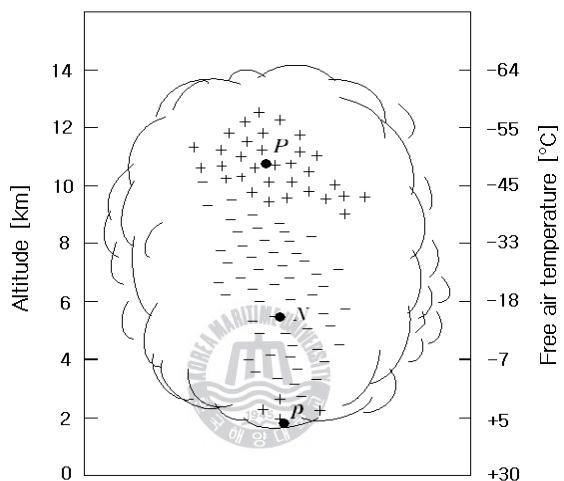


그림 2.2 전형적인 뇌운의 모델
Fig. 2.2 Typical model of the thundercloud

뇌운과 대지사이의 방전에 대한 진전 메카니즘은 그림 2.3과 같은 기본적인 과정들로 이루어진다.

먼저 예비절연파괴단계로서 그림 2.2의 뇌운내부의 N과 P의 운내방전이 일어나면 뇌운하부에 있는 부전하의 강한 집중은 대지로 향하는 전계를 발생시키고, 뇌운에서 대지로 절연파괴가 진전되기 시작한다. 뇌운의 전하에 의하여 형성된 전계의 세기가 대기의 절연내력을 넘어서면 초기방전이 시작되며 계단상으로 점진적 진전이 이루어지는데 이 과정을 스텝리더(stepped leader)라 한다.

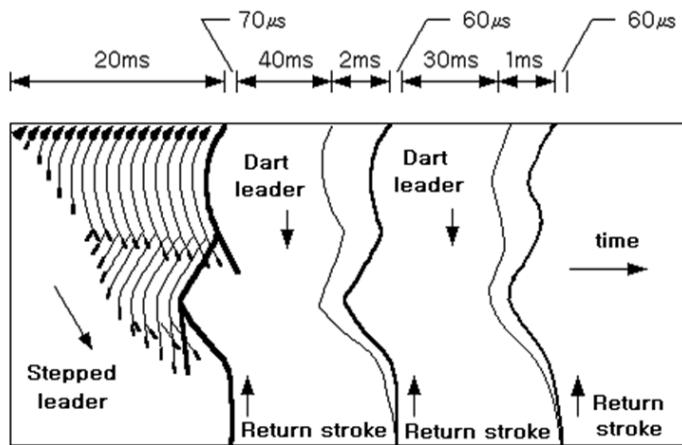


그림 2.3 낙뢰의 진전 메커니즘

Fig. 2.3 Propagation mechanism of lightning

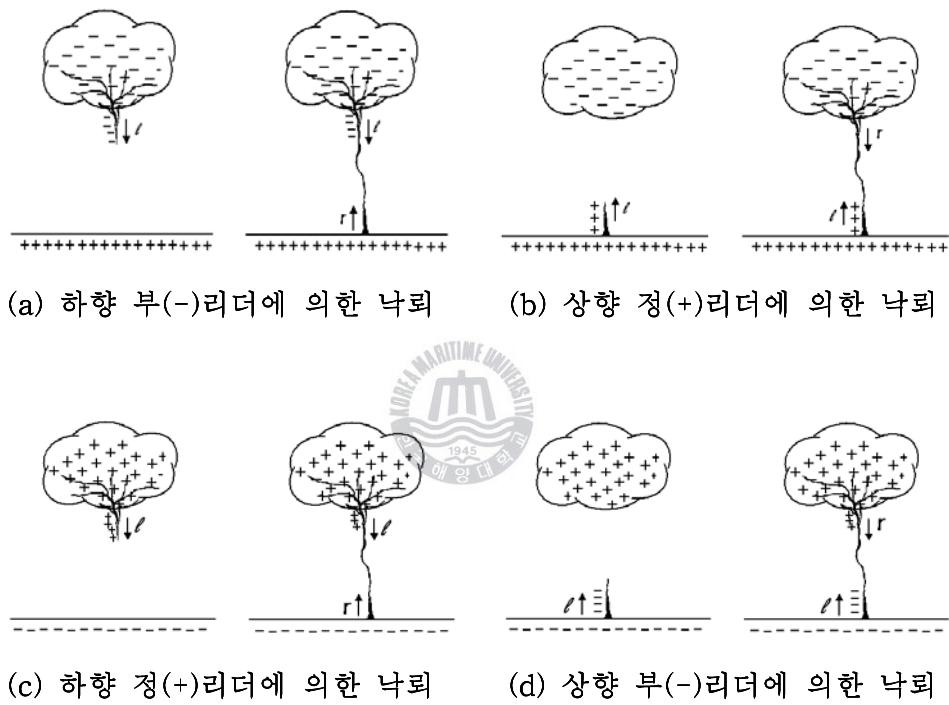
스텝리더는 보통 50 [m]씩, 약 50 [μs]의 시간차를 두고 간헐적으로 전전하며, 평균 속도는 1.5×10^5 [m/s]이다. 정(+)전하를 가지는 스텝리더가 대지 근처에 도달하면 대지 표면은 높은 부(-)전위로 유도되고, 대지표면에서 스텝리더쪽으로 향하는 방전을 발생시킬 수 있는 높은 전계가 형성된다. 이러한 방전중의 하나가 리더와 닿으면 리더 끝은 지면과 접촉하고, 리더의 접촉된 부분은 부(-)전하로 대전된 상태이다. 이처럼 스텝리더의 끝 부분이 대지에서 가장 가까운 부분 즉, 불평등 전계가 강한 부분에서 뇌운쪽으로 방전이 개시되는데, 이 과정을 부착 과정(attachment process)이라 한다.

부착과정이 끝나면 스텝리더와 상향리더가 만나 채널(channel)을 형성하여 대지에서 뇌운쪽으로 귀환뇌격(return stroke)이 발생하는데 이 때, 모든 방전 과정 중에서 가장 큰 전류가 흐른다. 즉, 스텝리더로 형성된 채널은 대지에서 뇌운쪽으로 향하는 귀환뇌격의 도전로가 되고, 귀환뇌격은 매우 강한 빛과 함께 보통 광속의 1/3~1/10로 진전하며, 지면

에서 뇌운까지의 약 $70[\mu\text{s}]$ 로 이동한다. 대지면에서 측정된 뇌격전류의 평균치는 대략 $10\sim20[\text{kA}]$ 이고, 피크치의 $50[\%]$ 로 감소되기까지 $20\sim60[\mu\text{s}]$ 가 소요된다. 이와 같은 첫 번째 귀환뇌격에 의하여 전하가 완전히 소멸되면 방전은 종료하게 되지만, 뇌운에 전하가 잔류하게 되면 후속 리더가 형성된다. 이 후속리더를 다크리더(dark leader)라고 하며, 두 번째 후속뇌격이 발생되기 위한 예비단계로 대지를 향해 진전하게 된다. 다크리더는 보통 기준에 형성된 채널의 경로로 진전하기 때문에 스텝리더보다 진전이 빠르며, 진전속도는 약 $2\times10^6[\text{m/s}]$ 이다. 또한, 일반적으로 지로(branch)를 형성하지 않으며 귀환뇌격 전류와 다크리더는 보통 $40\sim80[\text{ms}]$ 의 시간간격을 가진다. 귀환뇌격이 발생한 후 $100[\text{ms}]$ 이내에 다시 후속귀환뇌격이 발생하면 다크리더는 앞선 귀환뇌격의 통로를 따라 이동하고, $100[\text{ms}]$ 이후에 발생하는 경우는 보통 다른 채널을 통하여 진전한다. 귀환뇌격 전류는 뇌운을 향함으로써 전하가 중성이 되어 소멸되지만, 뇌운 내에 전하들이 남아 있으면 후속귀환뇌격(subsequent return stroke)이 다시 발생한다.

그림 2.4는 뇌운의 극성과 스텝리더의 진행 방향을 고려하여 대지 뇌방전을 분류한 것이다. 그림 2.4의 (a)는 부극성 낙뢰로서 뇌운에서 부극성의 리더가 대지쪽으로 진전하여 상부 도전통로(upper conduction channel)를 형성하고, 리더가 대지 가까이 진전되어 왔을 때 대지는 정전하로 대전되어 정(+)리더가 상향으로 발생하여 진전하게 되는 모습이다. 이것에 의하여 하부 도전통로(lower conduction channel)가 형성되며, 하향의 부(-)리더와 상향의 정(+)리더가 접촉하여 귀환뇌격을 이루게 되며, 주방전 영역(final breakdown region)은 대지의 상부에 형성된다. 그림 (b)는 정극성 리더가 대지에서 뇌운을 향하여 상향으로 진전하여 뇌격이 일어나는 경우이며, 그림 (c)는 정극성 낙뢰로서 정극

성의 리더가 뇌운으로부터 대지를 향하여 진전되어 뇌격에 이르는 경우이고, 그림 (d)는 부극성의 리더가 대지에서 출발하여 뇌운을 향하여 진전되어 일어나는 뇌격으로서, 뇌방전의 형태는 구조물의 높이에 따라 발생 빈도가 다르게 나타난다^{[5],[9]}.



【 1 ; 리더, r ; 귀환뇌격】

그림 2.4 스텝리더의 개시와 전파

Fig. 2.4 Stepped-leader initiation and propagation

2.2 대지전계 측정

전형적인 뇌운은 그림 2.2와 같은 $P-N-p$ 의 구조로, 주된 방전은 N 전하에 의해 일어나고, 발생원이 부(-)전하이므로 전계벡터는 대지로 향하는 방향 즉, 정(+)전하가 된다^{[5],[7]}.

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

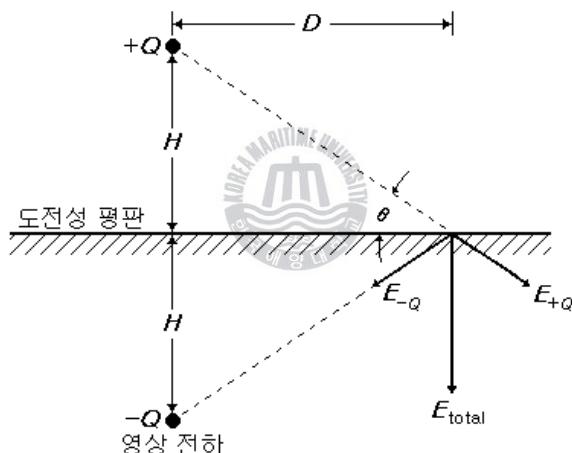


그림 2.5 전기영상법에 의한 전계 계산 모델

Fig. 2.5 Diagram for the calculation of the electric field intensity

도전성 평판으로부터 높이 H 에 위치된 점전하 $+Q$ 에 의해 발생되는 전계의 세기를 구하기 위해 전기영상법을 적용하였다. 그림 2.5에 보인 것과 같이, 부(-)의 영상 전하 $-Q$ 를 평판 아래 높이 H 인 지점에 두면, 점전하로부터 높이 H , 거리 D 만큼 떨어진 평판상 임의의 점에서의 전계의 세기는 다음과 같다.

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(H^2+D^2)} \text{ [V/m]} \quad (2.1)$$

각각의 전하에 의한 전계 벡터는 서로 다른 방향으로 형성되므로, 총 전계는 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 표현할 수 있다.



$$E_{\text{total}} = \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0(H^2+D^2)^{3/2}} \text{ [V/m]} \quad (2.2)$$

이 전계는 평판에 수직인 방향이고 정(+)의 값이다. 만약 $D \gg H$ 인 관계라면, 식 (2.2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{\text{total}} \approx \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0 D^3} = \frac{M}{4\pi\epsilon_0 D^3} \text{ [V/m]} \quad (2.3)$$

여기서, $M=2QH$ 는 전하 $+Q$ 와 영상 전하의 전기쌍극자 모멘트이다. 이와 같이 전하의 분포는 높운사이에서 주어지는 전체 전기쌍극자 모멘트의 분포라 할 수 있고, 전체 전기쌍극자 모멘트를 얻기 위해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M = 2 \sum_i Q_i H_i \quad (2.4)$$

여기서, 합성치는 대지 표면상에 존재하는 개개의 전하나 전하 띵여리를 총괄한 것이고, 부극성 전하를 포함하는 항은 (-)부호로 표시한다. 위에서 설명한 바와 같이 뇌운은 근본적으로 수직 전기쌍극자인데, 이것은 D 의 함수로서 뇌운의 접근에 따른 전계 변화 측정을 가능하게 하는 상부에 정 (+)의 쌍극자를 가진 구조이다. Q_N [C]의 부(-)전하를 방전하고 고도가 H_N 인 뇌운으로부터 수평거리가 D 인 대지에서 측정한 정전계 변화는 식 (2.2)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$E_{NG} = -\frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_N H_N}{(H_N^2 + D^2)^{3/2}} \quad [\text{V/m}] \quad (2.5)$$

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

$$M_{NG} = -2Q_N H_N = 4\pi\epsilon_0 E_{NG} D^3 \quad (2.6)$$

구름에서 대지까지의 고도 H_P 로부터 Q_P [C]의 정(+)전하의 방전에 기인하는 거리 D 인 대지에서 측정한 정전계 변화는 식 (2.2)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{PG} = +\frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_P H_P}{(H_P^2 + D^2)^{3/2}} \quad [\text{V/m}] \quad (2.7)$$

이것은 D 의 모든 값에 대하여 정(+)의 값이고, 만약 $D \gg H_P$ 라면, 쌍극

자 모멘트 변화의 소거식은 다음과 같다.

$$M_{PG} = +2Q_P H_P = 4\pi\epsilon_0 \Delta E_{PG} D^3 \quad (2.8)$$

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. 따라서 대지 전계의 세기를 관측하는 것으로 뇌운의 활동과 낙뢰 발생의 예지가 가능하다.

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 수면상에 존재하는 전계의 측정에 널리 활용되고 있다. 그러나 1~2 [kV/m] 이하의 전계는 측정할 수 없고, 침단 부식에 의한 특성변화로 측정 오차를 유발하는 등의 단점을 갖고 있어 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. 필드밀을 이용한 전계 측정은 일정한 면적의 도체 표면상에 유기되는 전하량을 측정하여 입사되는 전계를 측정하는 방법의 일종으로써, 인위적으로 입사 전계를 변화시킨다는 주요한 특징을 갖는다^{[10][12]}.

2.3 뇌방전 위치표정

뇌운의 이동을 감시하기 위해 뇌방전의 위치를 표정하는 기술과 시스템이 세계 각처에서 운용되고 있다^{[4],[13]}. 뇌방전의 관측을 위한 대표적인 시스템으로는 LLP(Lightning Location and Protection)와 LPATS (Lightning Positioning and Tracking System)가 있으며, 이 중 LLP는 DF(Direction Finding)방식을 적용한 시스템으로 직교 루프안테나를 복수로 배치하여 전자파의 수신방위를 감지하고, 수신된 방위에 대해 교차법으로 교점을 구한다. 또한 극성에 따른 정확한 방향을 추정하기 위하여 전계안테나가 함께 설치된다. 따라서 LLP 시스템의 경우 두 개 이상의 센서의 각 수신방위로부터 교차점을 구할 수 있으며, 진북을 정확하게 설정하는 것이 가장 중요하다.

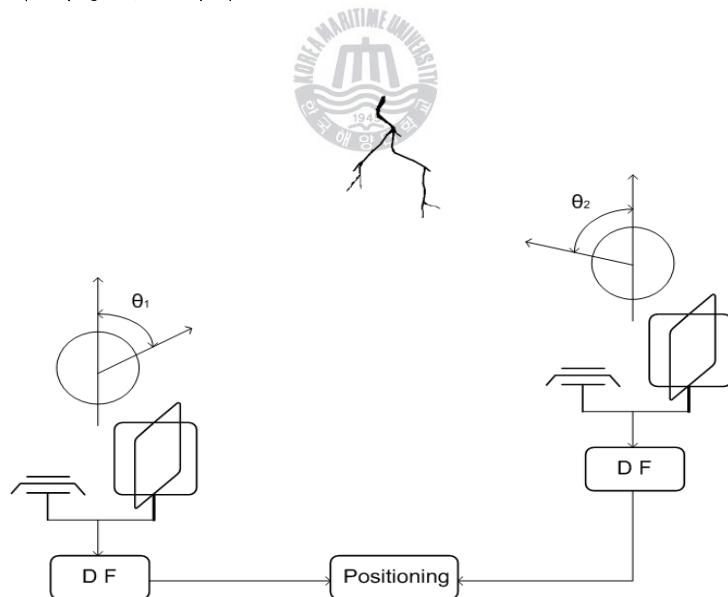


그림 2.6 LLP의 원리
Fig. 2.6 Principle of the LLP

LPATS는 TOA(Time of Arrival)방식을 적용한 시스템으로 전자파 펄스의 수신센서까지의 도달시간차로부터 2차원의 등간격 시간차 쌍곡선에 의해 낙뢰위치를 표정한다. 그림 2.7은 LPATS의 원리도를 보인 것으로 $S_1 \sim S_3$ 은 센서를 나타내며, $T_1 \sim T_3$ 는 뇌방전의 전자파가 각 센서에 도달한 시간, 쌍곡선은 두 개 센서간의 도달시간차를 나타낸 것이다. 이 시스템은 센서간의 시간차의 교차점을 구하는 것이므로 적어도 세 개 이상의 센서가 필요하고, 시간적인 정확도가 중요하게 작용하므로 시간의 동기화를 위해 GPS(Global Positioning System)기술을 이용한다.

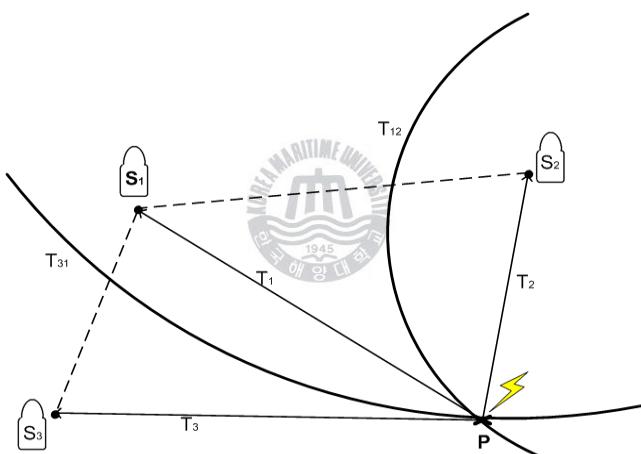


그림 2.7 LPATS의 원리
Fig. 2.7 Principle of the LPATS

이 밖에도 기존의 DF방식에 TOA방식을 조합한 IMPACT(Improved Accuracy from Combined Technology)시스템과 VHF/UHF대 전자파 펄스의 위상 차를 구하여 수신방위를 결정하는 간섭계 방식의 SAFIR(System de Surveillance et d'Alerte Foudre par Interferometrie) 시스템 등이 있으나 이러한 시스템은 고가의 장비로 뇌운의 광역적인 감시를 위한 것으로 국부적인 지역에서 활용은 부적절하다.

제 3 장 설계 및 제작

본 연구에서 개발한 뇌경보시스템은 그림 3.1과 같이 대지전계 측정장치, 방사자계 측정장치 및 경보장치로 구성된다.



그림 3.1 뇌경보시스템의 구성

Fig. 3.1 Configuration of the Lightning Warning System

대지전계 측정장치는 대지의 전계변화를 통해 뇌운의 접근 및 크기를, 방사자계 측정장치는 뇌방전시 전자계 파형을 측정하여 뇌방전 발생위치를 추정한다. 각각의 측정장치를 통해 산출된 데이터는 무선통신으로 경보장치에 전송된다. 무선통신방법으로는 IEEE Std 802.15.4에 정의하고 있는 ZigBee 통신방식을 사용하였으며, 전송속도와 전송범위는 각각 250 [kbps]와 150 [m]~1.5 [km]로 근거리 통신에 유용하게 활용될 수 있다.

경보장치는 수신한 데이터를 화면에 게시하고, 뇌경보 시퀀스에 따라 경보신호를 발생시킨다. 또한 PC와 연계하여 경보장치에 수신된 데이터의 지속적인 측정을 가능하도록 하여 데이터의 분석 및 자료 활용으로 사용할 수 있도록 설계하였다.

3.1 대지전계 측정장치

대지전계 측정을 위해 설계·제작한 원통형 EFM(Electric Field Mill)의 구성을 그림 3.2에 나타내었다. 고정된 센서전극과 접지된 차폐전극은 각각 6개의 다중전극 구조로서, 차폐전극이 직류전동기의 축에 연결되어 회전함으로써 센서전극에 입사되는 전계에 대해 노출·차폐를 반복시킨다. 센서전극의 가장자리에는 포토 인터럽터(Photo-interrupter)를 설치하여 회전하는 차폐전극의 위치를 검출하도록 하였다. 고정전극과 회전전극의 재질은 가볍고 내부식성과 가공성이 우수한 알루미늄판을 사용하였으며 내부 전동기 회전시 발생하는 잡음과 외부의 잡음 발생원에 대해 전자회로가 영향을 받지 않도록 고입력 임피던스의 증폭회로는 정전차폐 하였다 [14]~[17].

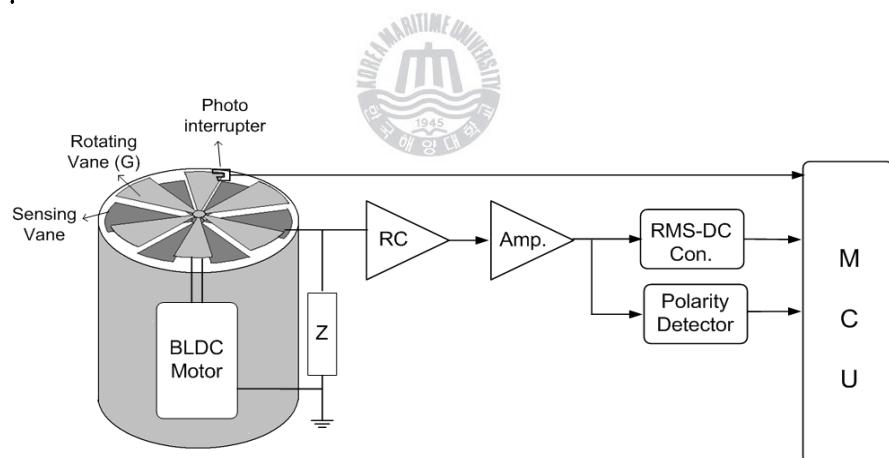


그림 3.2 EFM의 구성
Fig. 3.2 Configuration of the EFM

전계 입사 후 센서전극이 차폐되면 축적된 전하는 임피던스(Z)를 통해 전달되고, 정전계하에서 유도된 전하는 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다^[18].

$$q = \int \bar{D} d \bar{A} = \epsilon_0 EA \text{ [C]} \quad (3.1)$$

여기서, \bar{D} :전속밀도, \bar{A} :센서전극의 단면적
차폐전극의 회전에 의해 노출되는 센서전극의 단면적 a 는

$$a = \frac{A(1 + \sin \omega t)}{2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.2)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 ω 는 각속도이다. 따라서 센서전극에 축적되는 전하 q 는

$$q = \frac{\epsilon_0 EA(1 + \sin \omega t)}{2} \text{ [C]} \quad (3.3)$$

이 되고, 입력임피던스 Z_i 양단의 순시전압 $v(t)$ 는

$$v(t) = Z_i \frac{dq}{dt} = \frac{\epsilon_0 EA \omega}{2} Z_i \cos \omega t \text{ [V]} \quad (3.4)$$

로 표현할 수 있다. 입력임피던스 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

$$v_L = \frac{\epsilon_0 EA \omega R}{2} \text{ [V]} \quad (3.5)$$

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

$$v_h = \frac{\epsilon_0 EA}{2C} \text{ [V]} \quad (3.6)$$

로 주파수와 관계없이 입사된 전계의 세기에 비례함을 알 수 있다. $(\omega RC)^2 \gg 1$ 의 조건을 형성하기 위해서 시제작 EFM의 센서 전극 출력단에 접속되는 입력저항은 $1[\text{M}\Omega]$, 전동기의 회전수는 $2,000 [\text{rpm}]$ 으로 하여 정전계에 대해 충분한 응답특성을 갖도록 설계하였다. 신호처리를 위해 설계한 회로는 적분기, 증폭기, RMS-to-DC converter 및 극성 판별회로로 구성된다. 센서전극을 통해 검출된 신호는 시간에 대한 변화량이므로 원신호로 보상해주기 위해 적분회로를 설계하였으며, 2단의 증폭회로를 통해 미세한 신호를 증폭하였다. 증폭된 신호는 포토 인터럽터와 Shift register를 이용하여 정류시킨 후 RMS-to-DC Converter를 통해 직류의 출력을 내도록 하였다. 또한 극성판별회로는 비교기를 이용하여 정류된 신호를 입력시켰을 때 출력값으로 전계의 극성을 판별하도록 하였다. 본 연구에서 시제작한 EFM은 그림 3.3과 같다.

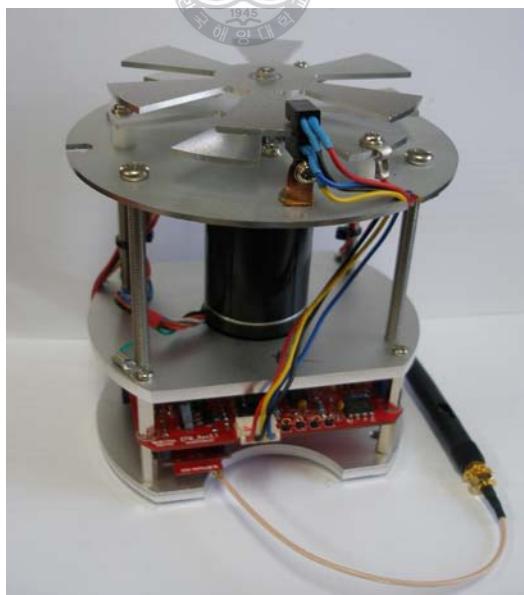


그림 3.3 EFM 사진
Fig. 3.3 Photograph of the EFM

3.2 방사자계 측정장치

낙뢰는 뇌운이 가진 전하가 공기전연파괴를 통해 대지로 방출되는 현상으로, 이 과정에서 전자계가 발생하여 대기중에 전파된다. 낙뢰의 발생위치는 전자파가 두 지점에 설치된 직교 루프코일에 감지되는 수신방위의 교차점을 구하거나, 세 지점 이상에 설치된 전자계 센서에 도달하는 전자파의 시간차로 분석이 가능하다^{[19]~[21]}. 그러나 제한된 영역에서의 낙뢰경보시스템에 적용하기에 이들 방식은 부적절하다. 따라서 본 연구에서는 협대역 안테나 회로와 직교 루프코일로 한지점에서 낙뢰위치를 추정할 수 있는 시스템을 제안하였다.

뇌방전에 의해 발생하는 전자계는 뇌방전의 극성, 거리, 방위, 뇌격강도 등 뇌방전의 특성을 유추할 수 있는 각종 파라미터를 포함하고 있다. 낙뢰위치의 측정을 위해서는 뇌방전에 의해 발생하는 전자계의 측정이 필수적이며, 이 때 발생하는 전자계의 극성 및 방향을 측정하면 낙뢰발생위치를 근사적으로 추정 할 수 있다^[22].

루프코일은 수십 [MHz] 이상의 고주파성분을 포함하는 시변자계의 측정이 가능하고, 고감도의 특성을 가지며 신호 대 잡음비(S/N비)를 크게 하면 출력전압을 높일 수 있다. 또한 잡음에 대한 영향도 거의 받지 않아 자계를 우수하게 측정할 수 있는 센서이다. 자계측정을 위한 루프코일의 장점은 다음과 같다.

- 자성재료를 포함하지 않으므로 비선형 특성이 나타나지 않으며, 측정범위가 이론적으로 무한대이다.
- 감도의 의존성이 없으며, 이론적 산출이 용이하다.
- 감지능력을 미리 평가할 수 있으며, 국부적인 자계의 측정이 가능하다.

루프코일의 동작원리는 다음의 맥스웰 방정식(Maxwell equation)을 기초로 한다^[23].

$$\int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.7)$$

여기서, \mathbf{E} : 전계의 세기, \mathbf{B} : 자속밀도, $d\mathbf{L}$: 루프의 미소길이,

$d\mathbf{A}$: 루프의 미소면적, Φ : 루프를 통과하는 전자속

루프코일의 등가회로는 그림 3.4와 같으며 L 은 코일의 자기 인덕턴스이며, R 은 루프코일 자체의 저항과 측정장치의 입력임피던스의 합이다.

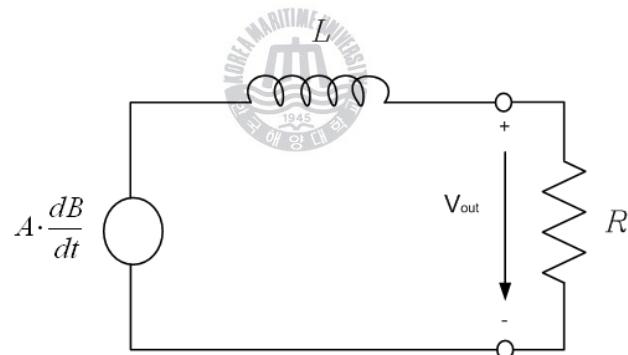


그림 3.4 루프코일의 전기적 등가회로
Fig. 3.4 Electrical equivalent circuit of loop coil

루프코일에 입사된 자계중 루프를 관통하는 전자속 쇄교수를 Φ 라고 하면 패러데이의 법칙에 의해 루프 안테나에 유기되는 전압 V 는

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (3.8)$$

가 된다. 루프코일의 면적에 대하여 자속밀도 $B [Wb/m^2]$ 가 균일하다고 가정하고, 루프코일의 면적을 $A [m^2]$ 라 하면 전자속 쇄교수 Φ 는 다음과 같다.

$$\Phi = B \cdot A \quad [Wb] \quad (3.9)$$

그림 3.4의 회로방정식은 키르히호프의 제2법칙(Kirchhoff's Voltage Law, KVL)에 의하여

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad [V] \quad (3.10)$$

로 표현할 수 있고, 식(3.8)~식(3.10)으로부터

$$-A \cdot \frac{dB}{dt} = L \frac{dI}{dt} + RI \quad [V] \quad (3.11)$$

의 관계가 성립된다. 만약 $RI \gg L \frac{dI}{dt}$ 이면,

$$I = -\frac{A}{R} \cdot \frac{dB}{dt} \quad [A] \quad (3.12)$$

로 되며, 이와 같이 출력전압 V_{out} 즉, 루프안테나에 감지된 전압은 자속밀도의 시변함수에 비례하여 동작한다. 또한 $RI \ll L \frac{dI}{dt}$ 인 경우

$$I = -\frac{A}{L} \cdot B \quad [A] \quad (3.13)$$

가 얻어지며, 감지전압은 직접 루프를 쇄교하는 자속에 비례하게 된다. 그리고 시정수는

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.14)$$

이므로 R 과 L 에 의해 응답특성이 나타난다.

직교 자계입력에 대한 루프코일의 출력전압은 전자의 조건에 대한 값으로 자속밀도의 시변함수에 비례하여 실제 입력자계를 측정하기 위해서는 신호처리회로가 필요하다. 이에 본 연구에서는 루프코일의 출력전압을 측정하기 위해 그림 3.5와 같이 회로를 설계하였다^[24].

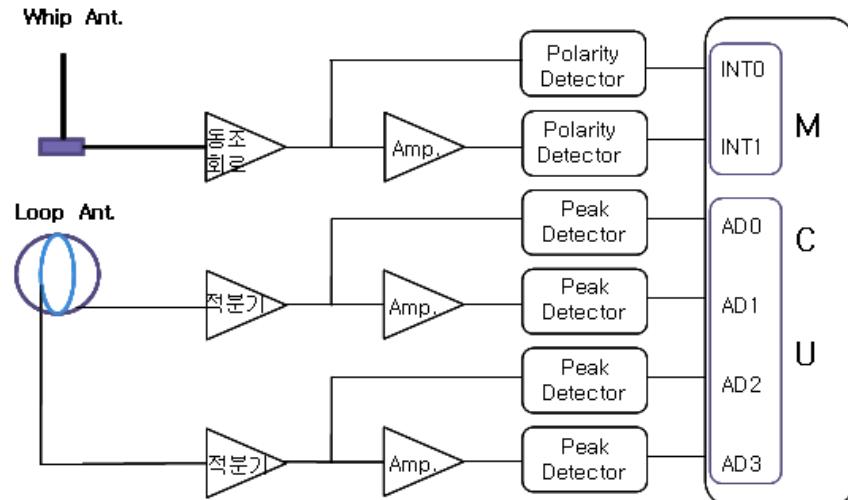


그림 3.5 전자계 검출회로
Fig. 3.5 Electromagnetic detection circuit

신호처리회로는 Whip안테나를 포함하는 전계측정회로와 Loop안테나를 포함하는 자계측정회로로 구성된다. Whip안테나는 동조회로 및 극성판별 회로를 통하여 방사전자파의 극성을 판별하며, Loop안테나는 적분증폭기 및 Peak Detector로 구성되어 자계파형의 최대값을 측정한다. 측정된 전자계파형은 MCU에서 뇌방전 위치표정 알고리즘을 통해 전자파가 입사된 방위 및 거리를 산출한다. 본 회로에서 시제작한 Loop회로는 그림 3.6과 같다.

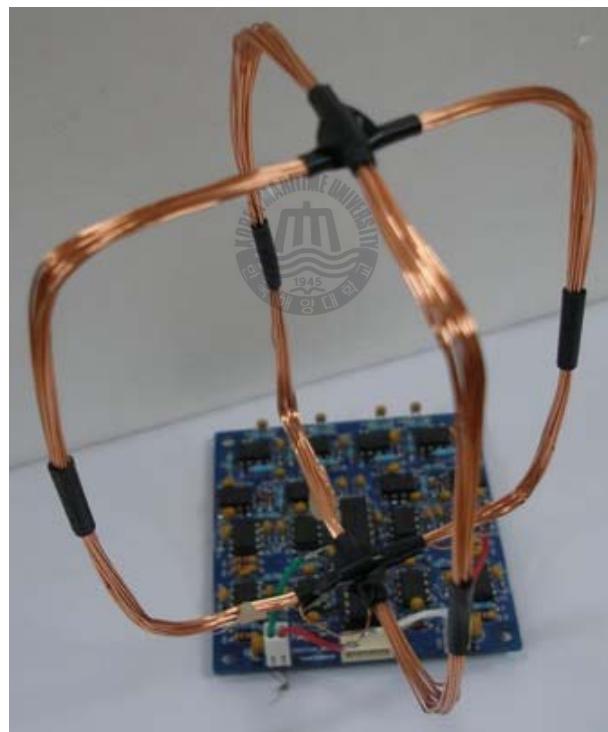


그림 3.6 루프회로 사진
Fig. 3.6 Photograph of the loop circuit

3.2.1 뇌방전 위치표정

뇌방전에 의하여 발생하는 전자계 파형의 특성은 상승시간, 피크 후 영점교차까지의 시간, 제 1귀환 뇌격 후 반대방향의 오버슈트 등의 파라미터와 밀접한 관계를 가지며, 이를 이용하여 설계한 뇌방전 위치표정 알고리즘을 표 3.1에 나타내었다^[24].

표 3.1 뇌방전 위치표정 알고리즘
Table 3.1 Algorithm for lightning position

조건		Case INT0 (정극성)	Case INT1 (부극성)
사 분 면	1	AD0>AD1 & AD2>AD3	AD0<AD1 & AD2<AD3
	2	AD0>AD1 & AD2<AD3	AD0<AD1 & AD2>AD3
	3	AD0<AD1 & AD2<AD3	AD0>AD1 & AD2>AD3
	4	AD0<AD1 & AD2>AD3	AD0>AD1 & AD2<AD3
방 위 각	1	$\tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_0}$	$\tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_1}$
	2	$\tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_0}$	$\tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_1}$
	3	$\tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_1}$	$\tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_0}$
	4	$\tan^{-1} \frac{AD_2}{AD_1}$	$\tan^{-1} \frac{AD_3}{AD_0}$

뇌방전 시에는 비교적 짧은 시간동안에 전하와 전류가 대단히 크게 변화하므로 방사파형은 운방전 위치로부터 감지용 전자계 검출센서까지의 거리에 따라 변화된다. 그럼 3.7에 낙뢰에 의한 자계 파형의 거리 의존성을 나타내고 있으며, 낙뢰위치가 관측지점으로부터 멀어질수록 영점교차점이 짧아지는 경향을 보인다^[5].

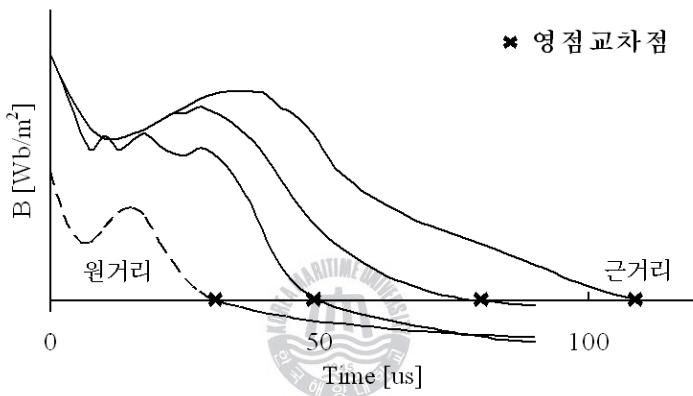


그림 3.7 거리에 따른 방사자계의 변화

Fig. 3.7 Changes of magnetic field waveform as a function of distance

뇌운 전체의 전하는 그림 2.5에서 설명한 바와 같이 전기쌍극자 모멘트로 나타나는 전하분포로 설정할 수 있으며, 방사지점으로부터 D 만큼 떨어진 지상에서 전기쌍극자에 의한 시변 전계와 자계의 세기에 대한 시간적 변화는 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다^[5].

$$E = \frac{[M]}{4\pi\epsilon_0 D^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c D^2} \left[\frac{dM}{dt} \right] + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 D} \left[\frac{d^2 M}{dt^2} \right] \quad (3.15)$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi D^2} \left[\frac{dM}{dt} \right] + \frac{\mu_0}{4\pi c D} \left[\frac{d^2 M}{dt^2} \right] \quad (3.16)$$

여기서 c 는 빛의 속도이며, $[M] = M(t - \frac{D}{c})$ 으로 대기중의 진전에 의해서 $(t - \frac{D}{c})$ 만큼 지연된 시간에서 얻어진 값이다. 식 (3.15)과 식 (3.16)은 아래의 조건을 만족시킴으로 성립될 수 있다.

(i) $D \gg H_i$

(ii) M 의 변화에 따른 전류의 크기와 위상이 전류의 방전로에 대하여 일정해야 한다.

(iii) H_i 의 값이 일정해야 한다.

전자계를 구하는데 있어 이 세가지의 조건들이 만족되면, 시간함수로서 전체의 쌍극자모멘트의 계산은 생략될 수 있다. 식 (3.15)의 첫 번째 항은 정전계 성분으로 전계에서만 나타나며, 두 번째 항은 유도성 성분으로 전류와 D^{-2} 에 비례하기 때문에 D 가 커질수록 정전계 항에서 보다 훨씬 더 큰 값이 나타난다. 식 (3.16)에서는 첫 번째 항이 유도성 성분이고, 식 (3.15)과 식 (3.16)의 마지막 항은 방사성분으로, 뇌격으로부터 빛의 속도로 전파되어지는 에너지이며, 전류의 시간적 변화율에 비례한다. 식 (3.15)와 식 (3.16)에서 방사성분의 항은 큰 값의 D 에서 상대적으로 더욱 커지게 되며, 나머지 항은 무시할 수 있다. 근거리에서 전계를 측정하면 정전계 성분이 주로 나타나고, 원거리에서 뇌방전이 발생하게 될 때는 방사성분의 전계가 주성분으로 나타나게 된다.

뇌격으로부터 약 10 [km] 지점에서는 전자계 변화의 유효주파수에서 수[kHz]분을 제외시키면 정전계 성분이 지배적으로 나타난다. 약 10

[km] ○내에서 측정이 이루어질 때는 위 조건중 제 (i)항의 $D \gg H_i$ 조건이 만족되지 않으므로 식 (3.15)는 성립하지 않게 된다. 100 [km] 이상의 거리에서는 방사성분이 지배적으로 나타나며, 10~100 [km]의 거리에서 측정할 경우에는 전자계 전체 파형에서 모든 성분이 포함되어 나타날 것이다.



3.3 경보장치

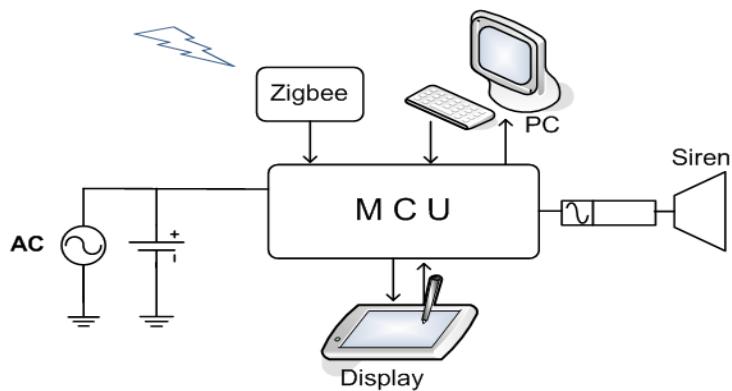


그림 3.8 경보장치의 구성
Fig. 3.8 Configuration of the alarm system

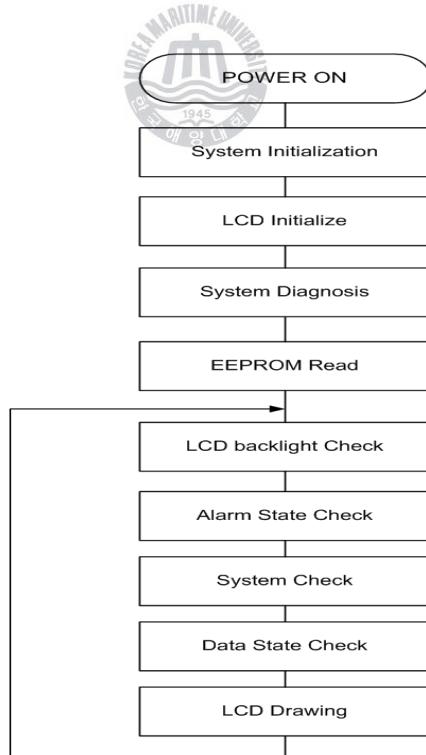
대지전계 측정장치 및 방사자계 측정장치에서 산출되는 데이터는 경보장치에 수신되어 경보제어, 데이터의 실시간 모니터링 및 자가진단의 기능을 수행한다. 그림 3.8은 그 구성을 나타낸 것으로 데이터의 관리 및 제어를 위한 MCU와 화면, PC 및 싸이렌등의 주변장치로 이루어진다.

3.3.1 동작 시퀀스

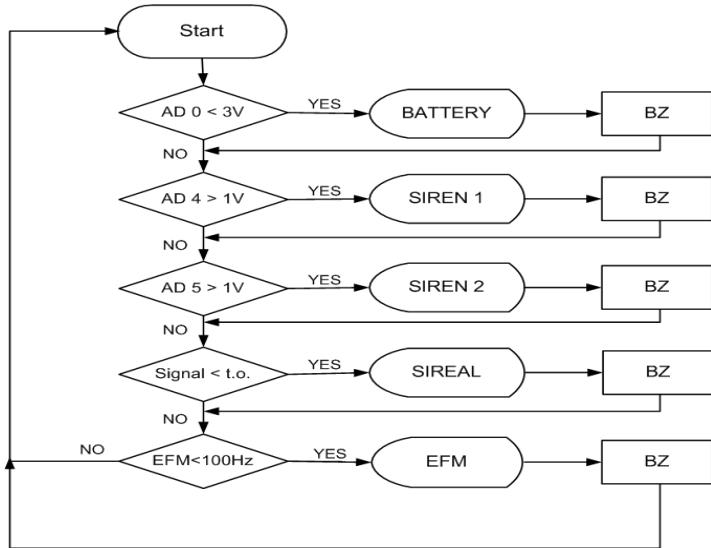
경보장치에서 데이터의 관리를 위한 시퀀스는 그림 3.9와 같으며, 전체 흐름도를 그림 3.9(a)에 나타내었다. 전원 입력시 시스템을 초기화시키고 첫화면을 출력한다. 메인화면에 들어가기전, 전원 · 싸이렌 · 통신 상태를 진단하여 출력하고, EEPROM을 읽은 후 화면의 출력상태를 정하기 위한 LCD의 Backlight상태가 체크된다. 다음 뇌경보 시퀀스의 동작레벨(Low, Standard, High)체크와 자가진단이 연속적으로 수행된다. 선택된 동작레벨의 뇌경보 레벨에 따라 수신되는 데이터의 경보

출력의 여부를 판단하고 메인화면을 출력하면, 메인화면이 출력된 상태에서 LCD 체크부터 통신, 경보단계, 자가진단, 데이터상태 체크를 순차적으로 무한 반복하면서 체크상태에 따른 세부적인 시퀀스를 수행하게 된다. 메인화면에서 자가진단의 항목은 경보장치의 전원, 싸이렌의 전원, EFM의 회전동작 및 통신상태로, 그림 3.9(b)와 같은 시퀀스로 동작을 수행한다. 진단항목이 고장상태가 되면 시스템 내부음과 함께 고장항목을 화면상에 출력한다.

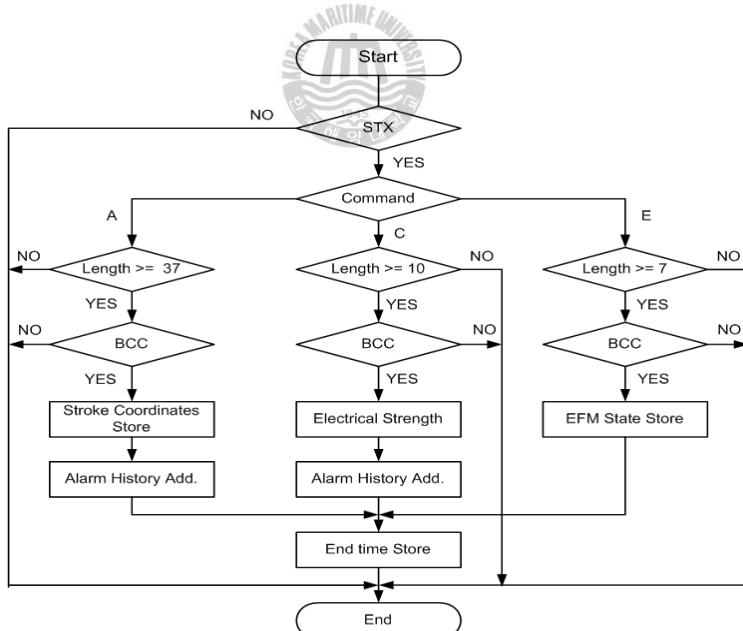
통신처리에서는 수신된 데이터의 length와 BCC(Block Check Code)를 확인하여 센서에서 보내는 데이터만을 받아들이고, 수신되는 데이터가 뇌경보레벨의 Warning 또는 Alert 상태일 때 시간과 함께 저장한다. 통신 시퀀스는 인터럽터로 처리하였으며 그림 3.9(c)와 같다.



(a) 전체 시퀀스도



(b) 자가진단 시퀀스



(c) 통신 시퀀스

그림 3.9 경보장치의 운전
Fig. 3.9 Operation of the alarm system

본 논문에서는 뇌경보를 위한 파라미터를 일정 대지전계의 세기가 지속되는 시간과 일정 반경내에 발생하는 뇌방전으로부터 뇌경보 레벨을 표 3.2와 같이 설정하였다.

표 3.2 뇌경보 레벨
Table 3.2 Lightning warning level

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

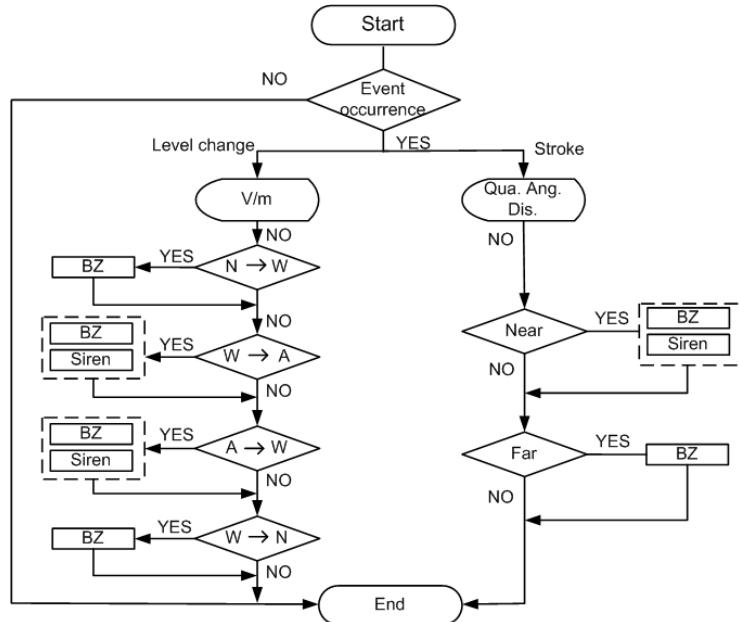


그림 3.10 뇌경보 시퀀스
Fig. 3.10 Sequence of lightning alarm

낙뢰 가능성의 레벨은 Normal, Warning, Alert 으로 분류하였으며, Alert이 될 때 경보하고, 다시 Normal이 되면 해제된다. 대지전계는 일정세기가 지속되는 시간에 따라 레벨이 결정되고, 뇌방전 발생의 경우 10 [km] 이내는 Alert, 25 [km] 이내는 Warning으로 분류되며, 그 반경 내에 10분 동안 뇌방전이 없으면 뇌방전으로 인한 경보는 해제된다. 대지전계의 세기와 낙뢰발생으로 인한 레벨이 다른 경우에는 더 위험한 레벨의 상태를 적용하고, 경보에서 해제신호를 발해야 할 경우 중복되는 해제시간 중 최후시간으로 출력한다. 또한 사용환경의 특성에 따라 뇌경보의 레벨을 조정할 수 있도록 High, Standard, Low의 세가지 단계로 조정 가능하도록 설계하였다. 시퀀스에 의해 뇌경보 발생 가능

성의 레벨을 판단하면, 그림 3.10과 같은 시퀀스의 동작을 수행한다. Stroke의 경우 Far는 Warning, Near은 Alert 상태가 되며, Warning으로의 레벨변화 시에는 내부 음만을, Alert으로 레벨변화가 될 때 내부 음과 외부경보가 동시에 출력된다. Alert에서 Normal로 변경시에도 내부음과 외부 해제음을 동시에 출력함으로 관리자와 활동자가 동시에 위험으로부터 해제되었음을 알도록 하였다.



제 4 장 평가 및 분석

4.1 대지전계 측정장치

시제작 필드 밀의 입사전계에 대한 출력전압 즉, 감도와 선형성의 평가를 수행하였다. 실험계의 구성은 그림 4.1에 보인 바와 같이 전계의 왜곡이 일어나지 않도록 직경 500 [mm]의 원형 동판을 상부에, 900 [mm]의 동판을 하부에 설치하고 하부원판의 중앙에 EFM을 고정시켰다. 상부 원판과 EFM의 센서전극간의 간격은 55.79 [mm]로 두고 DC 고전압 발생장치로 상부원판에 전압을 인가하여 정전계를 형성시켰다^{[25],[26]}.

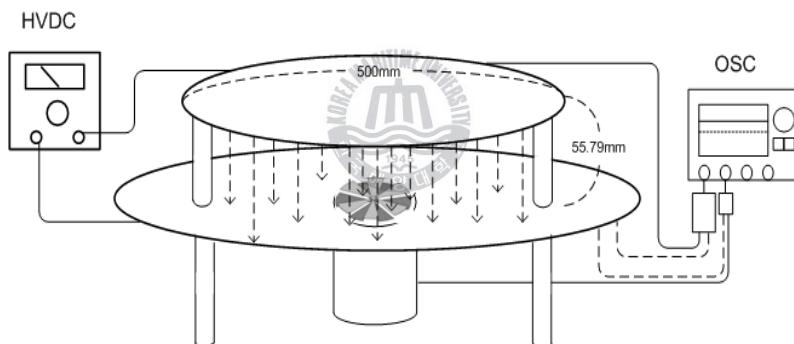


그림 4.1 교정계의 구성
Fig. 4.1 Configuration of the calibration system

EFM의 출력신호를 데이터화 하기위해 사용되는 MCU는 3.3 [V]의 전원, 10 [bit]의 데이터비트를 가지므로, 전계 측정범위를 상한 20 [kV/m]로 두고 약 69 [dB]의 이득으로 설정하였을 때, 감도는 0.15 [V/kV/m]이고, 3.2 [mV/bit]의 분해능을 가진다. 그림 4.2는 입사전계강도에 따른 EFM의 출력으로, 200 [V/m]~20 [kV/m]의 측정범위에서 EFM의 출력특성이 선형적으로 나타나고 있다.

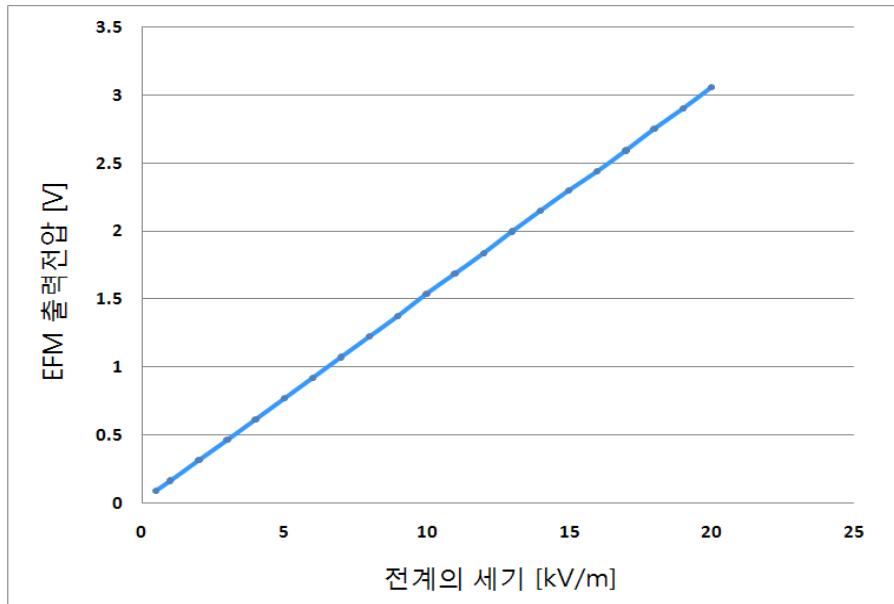
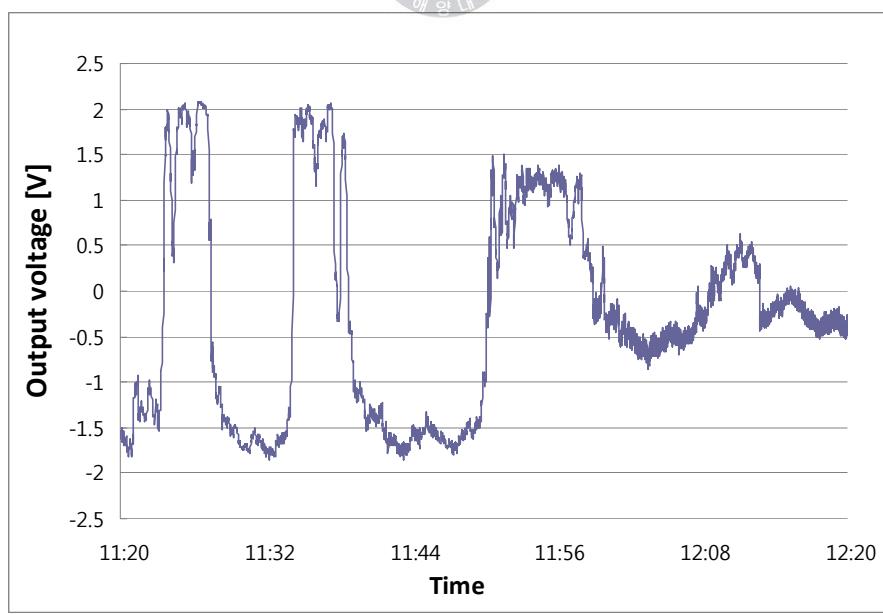
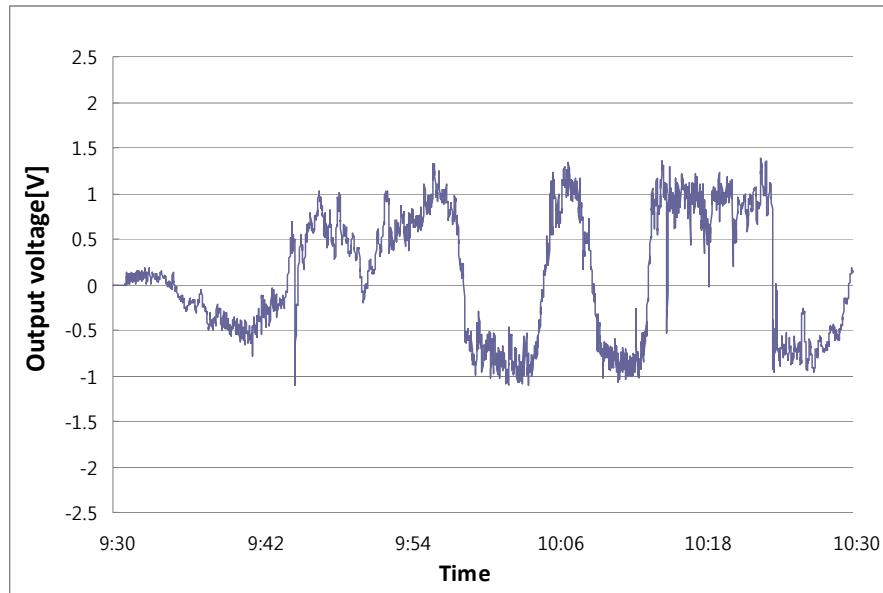
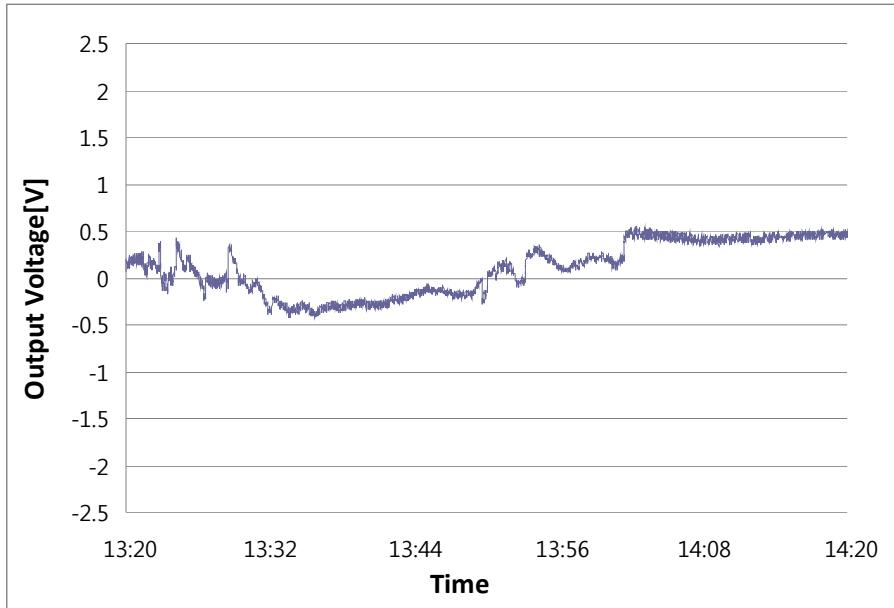


그림 4.2 EFM 출력 특성
Fig. 4.2 Output characteristic of the EFM

본 장치를 설치하여 측정한 우천시 대지전계의 변화를 그림 4.3에 나타내었다. 그림 (a)와 (b)는 뇌운의 이동, 뇌전하의 생성과 소멸 등으로 대지전계의 세기가 변화하는 것을 알 수 있고, 수차례에 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 전환된 것으로 판단된다. 반면에 (C)는 같은 날 측정한 대지전계이지만, 반복적인 뇌운의 전하방전 후 안정된 전계세기가 유지됨을 볼 수 있다.



(b)



(c)

그림 4.3 대지전계의 측정

Fig. 4.3 Measurement of the ground-level electric field

4.2 방사자계 측정장치

자계파형 검출회로의 주파수 응답특성은 루프안테나과 동일한 크기의 교정용 루프코일을 만들고 정현파 전류를 입력시켜 주파수에 따른 자계검출회로의 출력전압으로 평가하였다. -3 [dB]의 주파수대역은 그림 4.4와 같이 5.2 [kHz]에서 1.71 [MHz]로 낙뢰시 발생하는 자계파형을 측정하기에 충분한 특성을 갖는다.

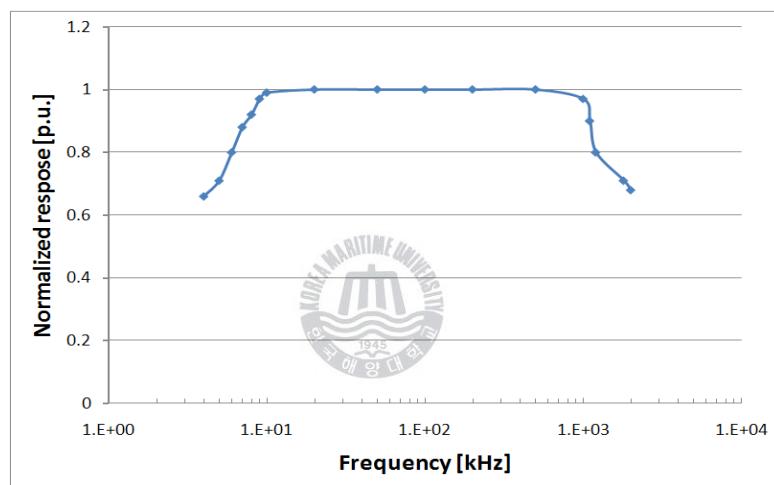
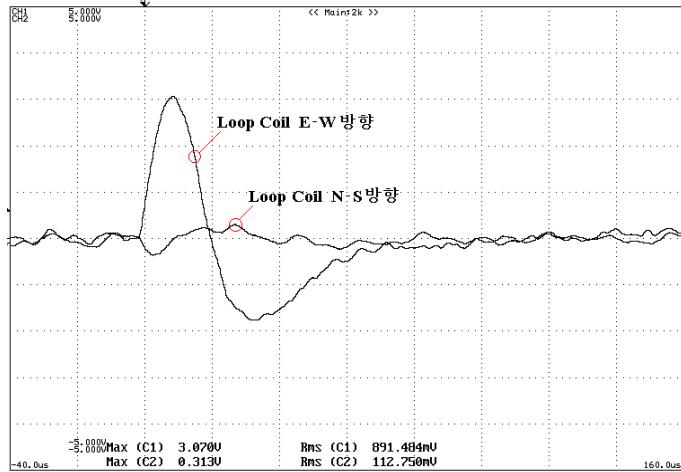


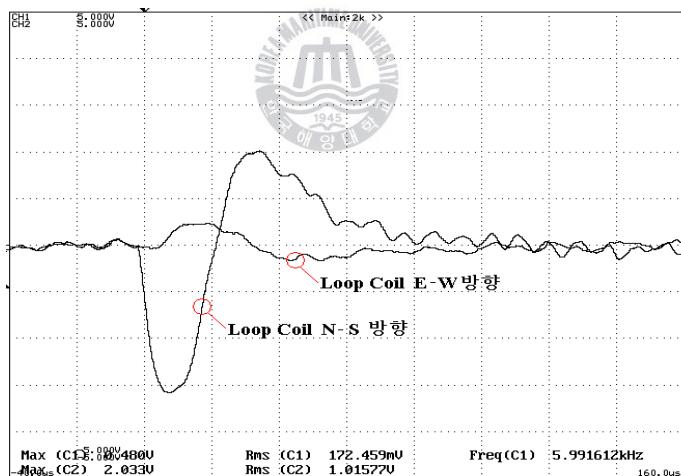
그림 4.4 자계 검출회로의 주파수 응답

Fig. 4.4 Frequency response of the magnetic field detection circuit

루프안테나로부터 50 [m] 떨어진 위치에 서지발생장치(PSURGE 4010, Haefely)를 설치하고 전자계신호 검출회로의 특성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 서지발생장치로부터 8/20 [us] 500 [A]의 정·부극성 서지를 발생시켰을 때, 전자계신호 검출회로의 출력 예를 그림 4.5에 나타내었다. 두 극성의 서지전류에 의한 방사자계가 루프코일의 방향(E-W 또는 N-S)에 따라 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.



(a) E-W 정극성

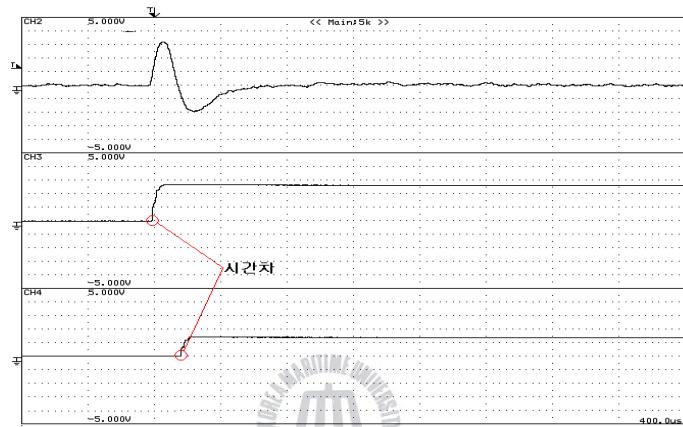


(b) N-S 부극성

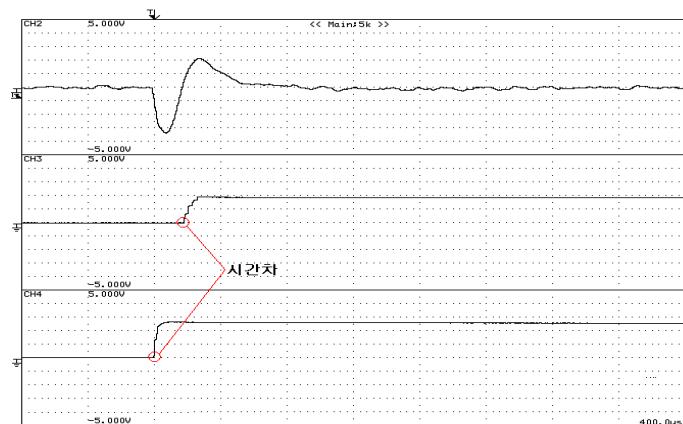
그림 45 자계파형의 예

Fig. 4.5 Examples of magnetic field waveforms

전자계 신호의 출력은 그림 4.6과 같이 정부극성 출력값에서 peak 검출 기로부터 최대값의 크기만 MCU의 A/D 입력에 전달된다. 동시에 영점 교차점 시간은 정 또는 부의 신호값에 대응하는 peak 검출기의 시간간격으로 측정한다.



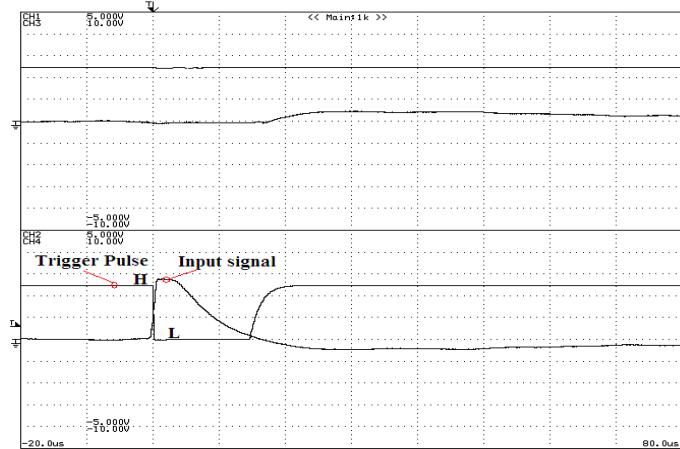
(a) E-W 정극성



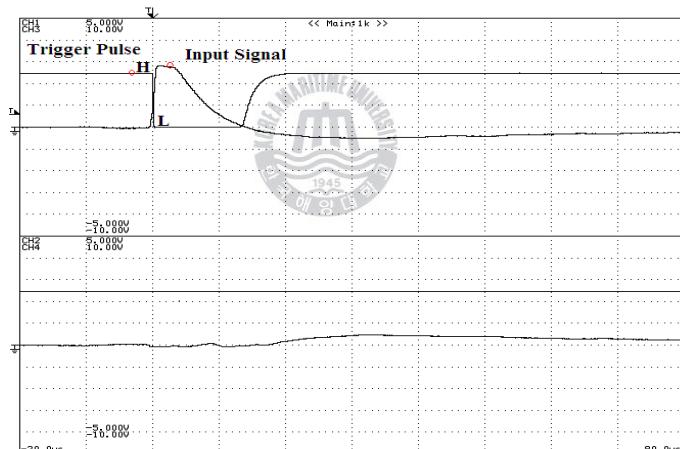
(b) N-S 부극성

그림 46 자계파형의 최대값 및 영점시간 측정

Fig. 4.6 Measurement of the peak and the zero-cross time
of magnetic field waveform



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 4.7 전계에 의한 트리거 예

Fig. 4.7 Examples of trigger by electric field

MCU에서 극성 판별은 그림 4.7에서 정극성 입력에 대해 INT0, 부극성 입력에 대해서는 INT1이 High에서 Low로 변화할 때 검출된다. 방사전계 파형은 극성만을 판별하는 것으로 크기는 측정하지 않는다.

상기의 대지전계 측정장치를 통해 측정된 전계의 세기와 방사자계 측정장치를 통해 산출된 뇌방전의 위치는 그림 4.8과 같이 경보장치의 화면에 출력된다.



그림 4.8 화면출력의 예
Fig. 4.8 Examples of display

4.3 뇌운 감지거리의 이론적 고찰

본 논문에서 시제작한 뇌경보시스템으로 측정할 수 있는 수평거리는 대지전계를 구하는 이론적인 수식으로부터 해석이 가능하다. 그림 2.2의 뇌운 모델에서 수직으로 위치한 정(+)의 전기쌍극자 일부분을 파괴하는 운내 방전에 의해, 거리 D 인 대지에서 측정한 정전계 변화는 식 (2.5)와 식 (2.7)로부터 다음과 같이 표현할 수 있고, 뇌운전하는 $Q_N = Q_P = Q$ 로 둔다^[5].

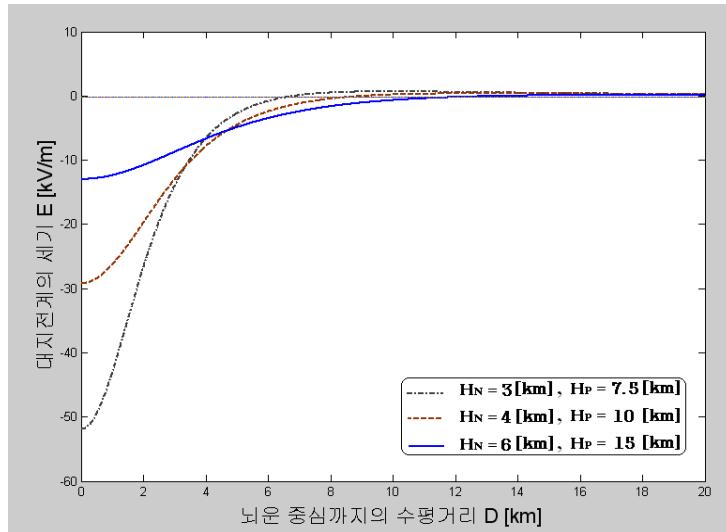
$$E_{PN} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{H_P}{(H_P^2 + D^2)^{3/2}} - \frac{H_N}{(H_N^2 + D^2)^{3/2}} \right] [\text{V/m}] \quad (4.1)$$

여기서, 전계의 변화는 D 가 증가하면서 부호가 반전되게 되므로, 가까운 D 에서의 전계 변화는 부(-)로, 먼 D 에서의 전계 변화는 정(+)으로 된다. 식 (4.1)을 도식화 하여 그림 4.9와 4.10에 나타내었다. 그림 4.9는 뇌운의 전하량 $Q = 40$ [C]일 때 뇌운고도에 따른 H_N 과 H_P 를 표 2와 같이 적용한 전계변화를, 그림 4.10은 18 [km]의 뇌운고도에 대한 H_N 과 H_P 값을 고정해 두고 Q 를 30, 50, 80 [C]으로 적용한 전계변화를 보여준다.

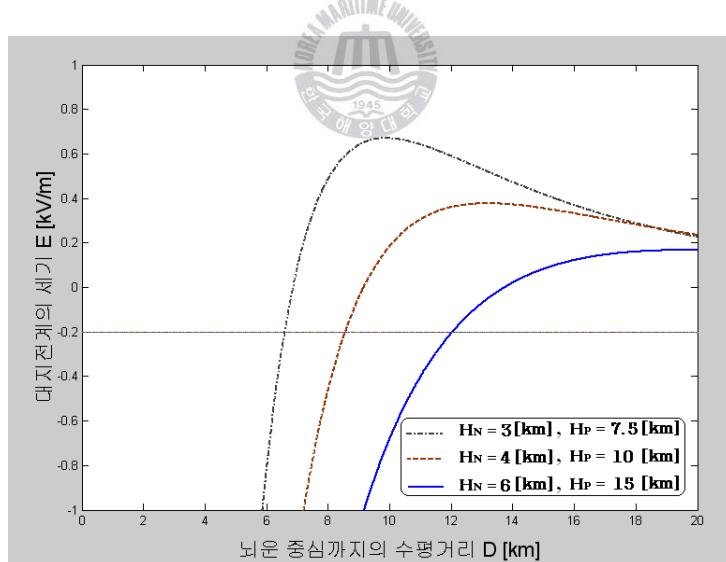
표 4.1 H_N 과 H_P 의 모델

Table 4.1 Model of H_N and H_P

뇌운의 고도 [km]	H_N [km]	H_P [km]
9	3	7.5
12	4	10
18	6	15

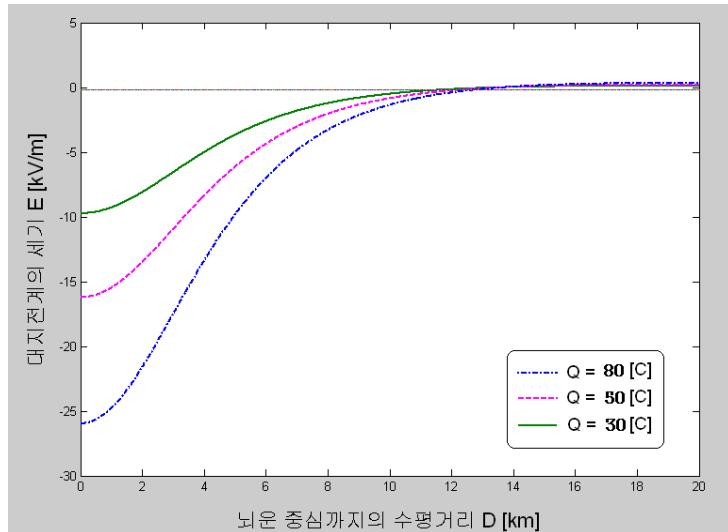


(a) 전체도 (-60 ~ 10 [kV/m])

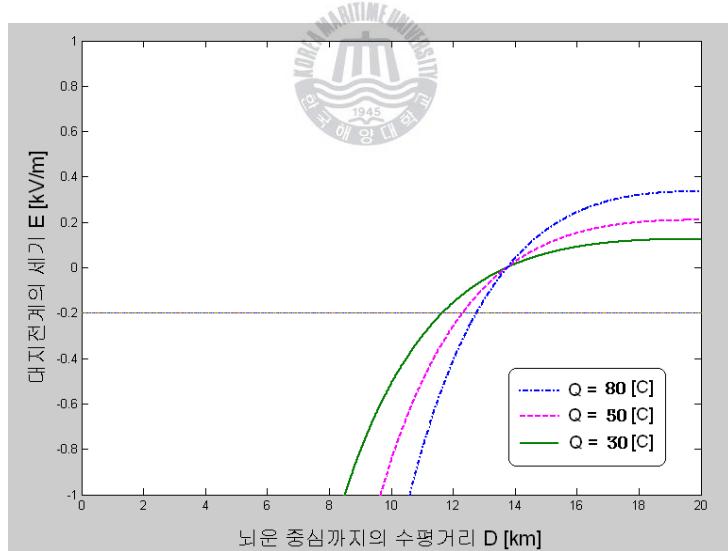


(b) 확대도 (-1 ~ 1 [kV/m])

그림 4.9 뇌운고도에 따른 전계세기의 변화
Fig. 4.9 Changes of electric field intensity according to thundercloud altitude



(a) 전체도 (-30 ~ 5 [kV/m])



(b) 확대도 (-1 ~ 1 [kV/m])

그림 4.10 뇌운전하량에 따른 대지전계변화

Fig. 4.10 Changes of electric field intensity according to thundercloud altitude quantity of thundercloud electric charge

그림 4.9는 극성이 반전되는 지점의 거리 D_0 가 뇌운의 높이에 관계함을 보여주고 있다. 뇌운의 높이가 높아질 때 대지전계의 세기가 약해지고 D_0 의 지점이 멀어지는 양상을 보이는데, 이것은 뇌운 속 전하의 분포가 상하로 길게 형성되면서 대지에 형성되는 전계의 세기는 약해졌지만, 정 전계 영역이 넓어졌음을 의미한다. 그림 4.10은 뇌운이 가진 전하량 Q 가 커짐에 따라 대지전계의 세기는 강해지나 D_0 의 지점이 동일함을 보여준다. 뇌운을 측정할 수 있는 최대거리, 즉 대지전계 측정센서의 최소감도를 측정할 수 있는 거리는 그림 4.9와 4.10에서 각각 6.65~12.8[km], 11.64~12.8[km]로 나타났다. 즉, 센서의 최소 측정감도가 약 200 [V/m]인 것을 고려할 때, 최대 12.8 [km]이내로 접근한 뇌운을 감지할 수 있으며, 뇌운의 전하량과 모양에 따라 측정범위에 편차가 있음을 알 수 있다.



제 5 장 결 론

본 논문에서는 낙뢰의 발생가능성을 예측하여 경보할 수 있는 뇌경보시스템 개발에 대하여 연구하였다. 지상에서 뇌운의 발생을 예측하기 위해서 뇌운에 의한 대지전계의 세기와 뇌방전시 발생하는 방사전자계로부터 뇌운의 활동을 감지한다. 본 시스템은 대지전계 및 방사전자계 측정회로와 신호처리장치로 구성되며, 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. 대지전계의 측정을 위해 회전평판형 EFM을 설계·제작하였으며, 감도는 150 [mV/kV/m] 로 $200 \text{ [V/m]} \sim 20 \text{ [kV/m]}$ 범위에서 선형적으로 대지전계의 측정이 가능하다.
2. 뇌운의 활동과 뇌방전의 위치를 추정하기 위해 뇌방전시 발생하는 전자계파형을 검출하였다. 방사전자계는 중심주파수 300 [kHz] 의 협대역 안테나로 검출하여 뇌방전의 극성을 판별하였으며, 방사자장은 주파수 대역이 $5.2 \text{ [kHz]} \sim 1.71 \text{ [MHz]}$ 인 직교루프안테나로 검출하여 자장의 도래방향을 산출하였다.
3. 전자장파형에서 분석된 뇌방전의 극성, 방사전자계의 최대값 및 영점교차점으로부터 뇌방전의 위치를 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.
4. 본 논문에서 개발한 EFM의 측정감도와 뇌운의 위치 및 전하량의 크기를 적용하여 산출한 뇌운감지범위는 최대 12.8 [km] 이었다.

참 고 문 헌

- [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] "National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2005", United Nations Framework Convention on Climate Change, 2007.
- [3] 기상청, "낙뢰연보 2007", pp.12~20, 2007.
- [4] 강인권, "최신 피뢰시스템과 접지기술", 성안당, 2004
- [5] Martin A. Uman, "Lightning", Dover Publications Inc., 1982.
- [6] 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.
- [7] M. A. Uman, "The Lightning Discharge", Academic Press, INC., 1987.
- [8] M. A. Uman, "Natural Lightning", IEEE Trans. Ins. Appl., Vol. 30, No. 3, pp. 785~790, 1994.
- [9] 안창환, "뇌방전에 의하여 발생하는 전장과 자장의 측정 및 분석". 인하대학교 박사학위논문, 1999.
- [10] S. G. Gathman, "Improved Field-meter for Electrostatic Measurements", Rev. Sci. Instrum., Vol. 36, No. 10, pp. 1490~1493, 1965.
- [11] P. E. Secker and J. N. Chubb, "Instrument for Electrostatic Measurements", J. Electrostatics, Vol. 16, pp. 1~19, 1984.
- [12] S. G. Gathman, "Guarded Double Field Meter", Rev. Sci. Instrum., Vol. 39, No. 1, pp. 43~47, 1968.
- [13] Reinaldo Silveira, "Report on operational use of Lightning Detection Methods", Instituto Nacional de Meteorologia, 2005.
- [14] 길경석, 송재용, 김일권, 권장우, 안창환, 이영근, "대지전계측정을 위한 필드밀의 설계 및 제작, 한국조명·전기설비학회지, 제 21권, 1호, pp.52-59, 2007.

- [15] David A. Hill, Motohisa Kanda, "Electric Field Strength", CRC Press LLC, 1999.
- [16] Dexter M.T.J. Williams, Imran H.A Hamid, Peng C. Zhou, "Wireless Cylindrical Electric Field Mill", Department of electrical & Computer Engineering University of Manitoba, 2006.
- [17] 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.
- [18] Mazen Abdel-Salam, et al., High-Voltage Engineering, 2nd Edition, Marcel Dekker, INC., 2000.
- [19] 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.
- [20] E. P. Krider, R. C. Noggle, and M. A. Uman, "Integrated wideband magnetic direction finder for lightning return stroke", J. Appl. Meteorol., Vol.15, pp.301~306, 1976.
- [21] 우정우, 과주식, 문재덕, 河崎善一郎, "낙뢰의 3차원 관측 위한 TOA방식 낙뢰감지기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 55C권 11호, pp.527~531, 2006.
- [22] Zen-Ichiro Kawasaki, "Dependency of VHF broadband Lightning source mapping on Fourier Spectra", Geophysical Research Letters, Vol.27, No.18, pp.2917~2920, 2000.
- [23] William H. Hayt, "Engineering Electromagnetic", 2001.
- [24] 길경석, 박대원, 김일권, 최수연, 안창환, 이영근, "뇌방전 위치표정에 관한 연구(1)", 조명·전기설비학회논문지, 제21권, 제10호, pp.1~8, 2007.
- [25] 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.
- [26] 길경석, 송재용, 김일권, "휴대용 극저주파 전계측정기 개발", 한국센서학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 120~126, 2000.