

비양기구로 운반되는 전계센서를 이용한 대기전계의 측정과 분석

(Measurement and Analysis of the Atmospheric Electric Field using Balloon-Carried E-Field Sensor)

김승민* · 이복희**

(Seung-Min Kim · Bok-Hee Lee)

Abstract

This paper is focused on the measurement and analysis of an atmospheric electric field which is caused by thunderclouds. The electric field due to thunderclouds changes very slowly. For this reason, the extremely low frequency E-field sensor needs to be used for measuring the atmospheric electric field strength. The balloon-carried E-field sensor system with the time constant of 1sec was designed and fabricated. The electric field sensor consists of 100mm×100mm copper plate, active integrator, high pass and low pass filters and batteries. The measurements of atmospheric electric fields were made by the balloon-carried E-field sensor and radiosonde, which sends the data back to ground in real time. From the calibration experiments, the response sensitivity of the E-field sensor was 0.154mV/kV/m in the frequency range of less than 1kHz. As a result from the actual experiment of the atmospheric electric field, the electric field signals were observed from the altitude of about 2.5km. Also, as the altitude was increased, the detected electric field wave oscillated with the fluctuation of sensing plate. The proposed method seems suitable for measurements of atmospheric electric fields, because it is inexpensive, simple to use and launch.

Key Words : Thunderclouds, Lightning discharge, Atmospheric Electric Fields, E-Field sensor, Active Integrator

1. 서 론

기후변화와 지구 온난화 현상으로 인해 낙뢰현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 이로 인한 인명, 전력설비, 건축물, 항공기 등의 피해가 증가하는 추세이다. 효과적인 낙뢰 방호대책을 세우는 것은 국민의 생명과 재산은 물론 국가 경제에 중대한 영향을 주는 요소이다. 갑작스런 집중호우나 낙뢰로 인해 현대 사회시스템과 기간 산업설비에 대한 많은 손실이 발생하고 있으며,

* Main author : Master's course, Dept. of Electrical Engineering, Graduate School, Inha University
** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Engineering, Inha University
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
Received : 2015. 11. 30.
Accepted : 2015. 12. 30.

건축물뿐만 아니라 정보통신설비, 우주발사체, 선박, 자연문화유산 등에도 피해 사례가 보고되고 있다 [1-3]. 외국에서는 국가연구기관을 통해 여러 가지 낙뢰 피해 대책기술 및 연구 성과들이 보고되고 있지만, 국내에서는 관련 연구가 미흡한 실정이다.

지상에서 낙뢰 활동을 관측할 수 있는 방법은 기상레이더, 침단 코로나 방식, 자계 감지형 안테나, 필드밀 등이 사용되고 있다[4-7]. 기상레이더는 전자파를 이용해 탐지하고자 하는 물체를 원격으로 감지하며, 뇌운의 규모, 강도의 판정 및 위치를 추정하고 있으나, 매우 고가의 설비가 필요하므로 연구 설비로는 사용하지 못하고 있는 실정이다. 침단 코로나 방식은 뇌운이 접근할 때 발생하는 코로나 방전전류를 검출한 후 증폭하여 뇌운을 감지하는 센서로 사용하고 있으나, 전계강도가 수십kV/m 이상에서만 관측이 가능하므로, 뇌운의 전하량이 많은 경우이거나 낙뢰가 매우 근접한 조건이 아니면 관측하기가 어려운 문제점이 있다. 특히 10kV/m 이하의 전계는 거의 측정이 불가능하다. 또한 코로나전류 검출방식은 침단 부식으로 인해 특성이 변화하며, 빗방울에 의해 정확한 관측이 불가능한 단점이 있다. 자장 감지형 안테나는 낙뢰가 발생하여 전류가 흐른 경우에 루프안테나를 통해 자장을 감지하여 뇌운의 위치 추적 등에 활용 되지만, 뇌방전을 동반하지 않는 경우에는 관측을 할 수 없는 한계가 있다.

최근 뇌운에 의한 정전계의 측정에 가장 많이 사용되는 센서로 필드밀이 있다. 필드밀의 경우 시정수가 무한대인 안테나라고 할 수 있기 때문에, 뇌방전을 동반하지 않는 뇌운에 의한 전계도 측정이 가능하며, 낮은 전계영역도 관측이 가능한 장점이 있다. 하지만 비를 맞거나 오염 등으로 인한 감지전극과 대지 간의 절연저항 저하로 인해 측정의 정확도가 낮아지는 문제를 야기시킨다.

선진국에서는 위에서 소개한 방법 외에도 뇌운에 와이어가 부착된 소형 로켓을 쏘아 인공적으로 낙뢰를 유발시켜 인공 낙뢰에 의한 방전현상을 연구하고 있으며, 기구에 직접 전계센서를 매달아 구름의 전하량을 측정하는 등 낙뢰 현상을 연구하고 낙뢰에 의한 피해를 예방하기 위해 여러 가지 침단 방법을 동원하고

있다[8-11].

국내에는 필드밀을 이용하여 대기전계를 측정하고 있으며, 대부분 제품을 외국에서 수입하여 운영하고 있는 현실이다. 침단코로나 검출방식은 아직 전계의 세기의 측정에는 활용하고 있지 못하지만 뇌운의 감지를 통한 낙뢰경보시스템에 적용되고 있다. 인공위성과 같은 우주발사체를 쏘아 올릴 때 뇌운은 발사체에 정전기방전을 일으켜 전자회로가 오동작하는 요인이 되므로 우주발사체를 쏘아 올리기 전에 대기상태를 조사/분석하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 비양하는 기구에 전계센서를 부착하여 뇌운에 의한 정전계를 측정하는 장치와 기술의 개발에 대한 내용을 기술하였다. 비양하는 기구에 전계센서를 부착하여 대기전계를 측정하는 경우 뇌운의 전계변화량은 비양하는 기구의 속도와 관련되며 기구의 비양속도는 대략 5m/sec정도이므로 대기전계는 매우 느리게 변하게 된다. 따라서 매우 느리게 변화하는 전계를 측정하기 위해서는 초극저주파의 전계센서가 필요하다.

본 논문에서는 뇌운에 의한 정전계 측정을 위한 전계센서의 설계와 제작 및 기본특성의 분석을 다루었다. 센서 전극으로는 얇은 구리판을 이용한 평판형 전극으로 선정하였으며, 검출감도를 고려하여 100mm×100mm의 크기로 결정하였다. 검출신호처리를 위한 적분기는 능동성 소자를 이용하여 구현하였으며, 시정수 1초 이하에서 작동하도록 검출회로를 설계/제작하였고, 센서의 응답감도와 주파수 대역 등의 기본동작특성을 분석하였다. 완성된 센서의 정확도를 산정하기 위하여 ANSI/IEEE std 644[12]에서 제안하는 교정방법에 따라 교정장치를 제작하고 정확도를 평가하였으며, 헬륨기구에 전계센서와 상용의 라디오존데를 장착하여 비양시켜 대기전계를 검출하고, 지상으로 전송된 데이터를 분석하였다.

2. 센서의 구성 및 교정

2.1 전계센서의 설계 및 제작

뇌운에 의해 형성되는 자유공간에 존재하는 전계의 수직성분을 산란 없이 정확히 측정하기 위해서는 응

답감도가 우수한 평판형 전계센서가 가장 적합하다. 따라서 본 연구에서는 100mm×100mm 평판형 검출전극의 면이 대지면에 대하여 평행으로 놓일 수 있는 평판형 전계센서를 설계하였으며, 검출신호의 실신호 변환을 위해 능동성 적분기를 적용하여 전계센서시스템을 제작하였다. 능동성 적분기를 이용한 전계센서의 블록도 및 회로도를 그림 1에 나타내었다.

운방전에 의한 뇌서지의 이상전압으로부터 제어회로를 보호하기 위하여 검출 동판과 적분기 사이에 보호회로를 구성하였다. DC 75V의 방전개시전압을 갖는 가스방전관(gas discharge tube: GDT)과 Vz 3.3V의 Zener Diode를 사용하여, 임펄스전압 100V 이하에서는 소자가 동작하지 않으므로 측정신호에 영향을 주지 않게 하였으며, 100V 이상에서는 GDT와 Zener Diode가 동작하여 이상전압이 회로로 유입되지 않도록 하였다.

능동성 적분기는 검출감도를 높이기 위하여 정전용량이 비교적 작은 커패시터(C1)를 사용하였으며, 시정수 1sec를 맞추기 위하여 그림 1 (b)의 적분기의 레환부 회로저항을 T형 회로망으로 구성하여 매우 큰 값을 갖도록 하였다. T형 회로망의 합성저항은 식 (1)과

같이 구할 수 있다[13].

$$R_{eq} = R_3 + R_4 + \frac{R_3 R_4}{R_5} \quad (1)$$

$$\tau = R_{eq} \times C \quad (2)$$

시정수가 작은 저주파대역의 적분기의 경우 연산증폭기 자체의 오프셋전압(offset voltage)이 출력신호에 영향을 주게 된다. 지상관측의 경우 디지털 오실로스코프로 오프셋전압 부분을 상쇄시킬 수 있지만, 센서를 공중에 비양시켜 뇌운의 전계 변화량을 측정하는 경우 이러한 방법을 사용할 수가 없다. 또한 오프셋전압이 낮은 가격이 비싼 연산증폭기를 사용할 수도 있지만, 적분기 출력단에 HPF(high pass filter: 고역통과필터)를 구성함으로써 이러한 문제를 해결하였다.

커패시터(C2)와 저항(R6)을 첫 번째 연산증폭기의 출력부에 직렬로 연결함으로써 식 (3)과 같은 차단주파수 특성을 갖는 HPF를 구성하였다.

$$\text{차단주파수} = \frac{1}{2\pi R_6 C_2} \quad (3)$$

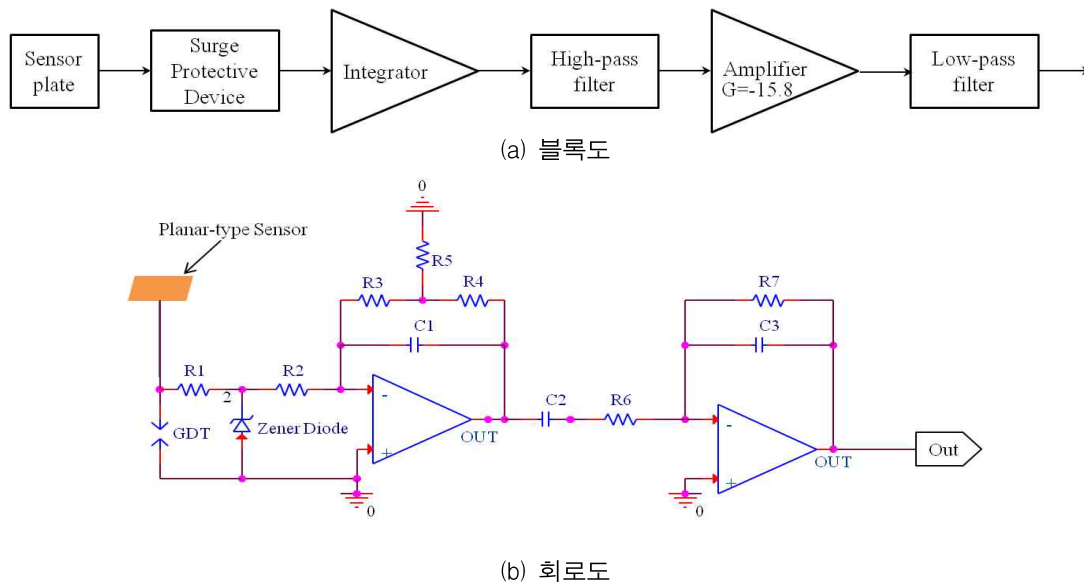


Fig. 1. Schematic diagram of the electric field measuring system

실질적으로 센서의 검출전극인 동판에 의해 검출된 신호는 매우 미약하므로 증폭기를 적용하여 신호를 증폭할 필요가 있다. 증폭기 케환부의 저항(R_7, R_8)과 커패시터(C_3)를 병렬 연결하여 LPF(low pass filter: 저역통과필터)겸 증폭기를 구성하였다[14].

연산증폭기의 기본적인 증폭도를 계산하는 방법은 케환측 합성임피던스 식 (4)를 입력측 합성임피던스 식 (5)로 나누어 주는 것으로 최종적으로 증폭기의 증폭도 계산식은 식 (6)과 같다.

$$Z_i = \sqrt{R_6^2 + X_c^2} = \sqrt{R_6^2 + \frac{1}{2\pi f C_2}} \quad (4)$$

$$Z_f = \frac{R_7 X_c}{\sqrt{R_7^2 + X_c^2}} = \frac{R_7 \times \frac{1}{2\pi f C_3}}{\sqrt{R_7^2 + (\frac{1}{2\pi f C_3})^2}} \quad (5)$$

$$\frac{Z_f}{Z_i} = \frac{R_7 \times \frac{1}{2\pi f C_3}}{\sqrt{R_6^2 + (\frac{1}{2\pi f C_2})^2} \times \sqrt{R_7^2 + (\frac{1}{2\pi f C_3})^2}} \quad (6)$$

2.2 전계센서의 교정

본 연구에서 제작한 평판형 전계센서시스템에 대한 응답감도와 주파수 대역 등 계측기로서의 고유기본특성을 산출하기 위해서는 교정실험의 수행이 필요하므로 전계센서시스템에 균일한 전계를 가하기 위해 ANSI/IEEE std 644[12]에서 권장하는 전계센서에 대한 교정실험 장치를 설계·제작하였으며, 교정실험 장치의 단면도를 그림 2에 나타내었다.

교정장치의 기계적 안정도를 확보하기 위해서 외부 틀은 알루미늄 프로파일을 이용하여 제작하였으며, 교정장치의 전극판으로 사용된 알루미늄 평판은 1000mm×1000mm의 크기로 제작하여 상부와 하부에 설치하였다. 하부전극을 상하로 이동시킬 수 있도록 제작하여 입력전극 간의 간격을 최소 100mm에서 최대 1600mm까지 조정할 수 있다. 교정실험을 수행함에 있어 전계의 입력을 위한 전극, 전계센서

와 전원장치, 계측 장치의 배치를 기반으로 한 교정 실험회로의 개략도 및 사진을 그림 3에 나타내었다. 전계센서의 응답감도의 측정에는 60Hz의 고압용 변압기로 전계를 입력시켜 이에 대한 응답특성을 평가하였다.

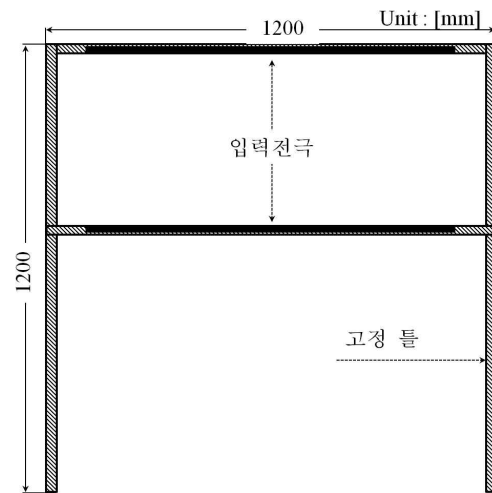
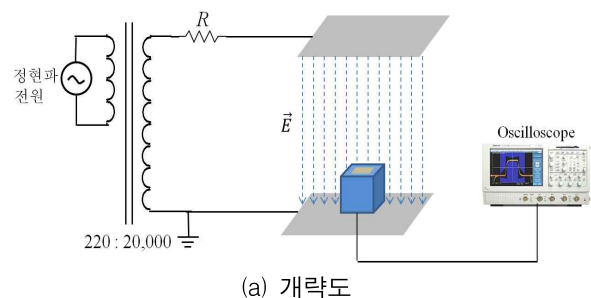


Fig. 2. Cross-sectional view of the device for calibrating the electric field sensor



(a) 개략도



(b) 사진

Fig. 3. Schematic diagram and photograph of the calibration setup for E-field sensor system

3. 결과 및 고찰

3.1 전계센서의 응답특성

본 논문에서 설계하고 제작한 전계 검출센서의 기본 성능을 측정하기 위해 특정 주파수를 갖는 전계를 입력전극에 가하여 센서의 출력전압을 측정하였다. 그림 4와 같이 회로 앞단에 적분기 캐환 커패시터와 동일한 C_4 를 접속하여 적분기의 입력과 캐환임피던스를 동일하게 하여 순수히 증폭기만의 증폭도를 확인하였다. 실험은 함수발생기를 이용하여 입력신호에 크기 100mV의 정현파 전압의 주파수를 변동해 가며 가하였다.

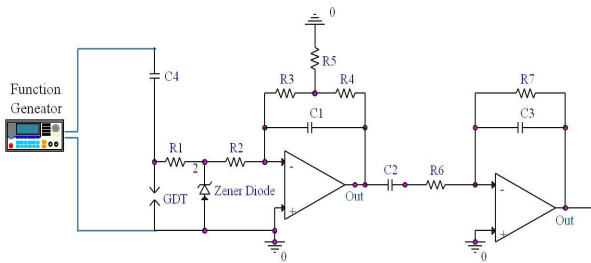


Fig. 4. Circuit diagram of verifying the amplification factor of electric field sensor

입력 전계의 주파수에 따른 센서의 증폭도를 검증하기 위한 실험의 결과를 그림 5에 나타내었으며, 이론적인 증폭비 15.8 배에 비해 실험에 의해 측정된 증폭비는 약 16.2배로 약 2.5%의 편차가 발생하였다.

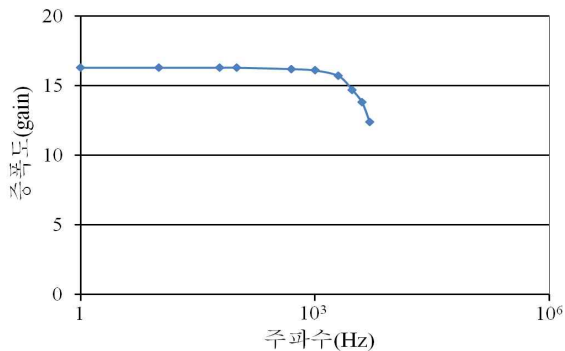


Fig. 5. Frequency response characteristics of the electric field sensor

이것은 소자 자체의 허용오차, 솔더링 작업, 계측기 및 측정의 우연오차 등으로 인해 발생한 것으로 사료된다. 또한 1kHz이후부터는 신호의 감쇠가 나타나는 것으로 보아 LPF가 정상적으로 동작하여 고주파수 영역의 신호는 감쇠시키는 것으로 나타났다.

다음은 슬라이더와 변압기를 사용하여 입력 전계의 세기를 점차적으로 증가시켰을 경우의 응답신호의 크기를 평가하였다. 그림 6에서 입력 전계는 교정장치에 가한 입력 전압을 전극의 간격으로 나눈 값으로 산출하였으며, 전극간격 25cm와 34cm의 2조건에서 측정된 결과는 검출전극 주변에 형성되는 불평등전계에 의해 출력 값이 약간 달라지는 것을 확인할 수 있다.

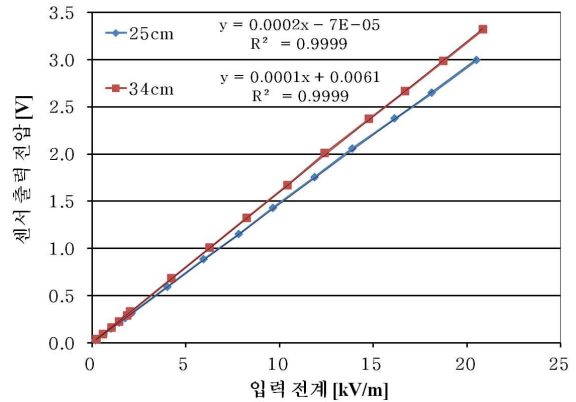


Fig. 6. Response characteristics of the electric field sensor

교정실험을 통해 측정된 시작품 센서의 응답감도는 0.154mV/V/m이며, 실제 전계센서로 뇌운의 전하에 의한 전계의 세기를 측정할 때 뇌운과 전계센서 사이의 전계불평등 정도는 매우 클 것으로 예상되며, 이러한 점을 고려하여 응답감도를 산출할 필요가 있다.

3.2 비양 실험결과

그림 7에 나타낸 바와 같이 2014년 9월 29일과 2014년 10월 01일에 완성된 시작품 전계센서를 헬륨기구로 비양시켜 대기전계의 실측을 위한 실증실험을 수행하였다.



(a) 시제품 센서



(b) 센서 비양

Fig. 7. Photographs of the prototype electric field sensor and balloon-carried experiments

전계센서와 라디오존대를 헬륨가스로 충전된 비양기구[15]의 끝단에 매달았으며, 온도센서와 습도센서를 장착시킨 라디오존대를 이용하여 측정데이터를 실시간으로 지상으로 전송받았다. 헬륨을 충전시킨 기구는 약 5m/sec의 속도로 상공으로 비양한다. 전계센서를 비양시켜 측정한 실험결과의 예를 그림 8에 나타내었다. 측정결과의 데이터에서 세로축은 고도를 나타내며 가로축은 각각의 온도, 습도, 전계의 세기에 대한 데이터를 나타낸다.

실험결과 고도 2.5km부근부터 전계의 세기를 검출한 신호가 나타났으며, 고도 약 4.5km 이상에서는 진동현상이 나타났다. 전계신호가 나타나는 경우는 전계센서가 전하가 운집한 곳을 향해 접근하면서 전계의 값이 점차 증가하였다가, 전하운집지역을 통과 후 점점 거리가 멀어짐에 따라 강하하는 것으로 판단된다. 고도 4.5km이상에서 그래프에서 나타난 것과 같은 진동현상의 경우 대기가 불안정하고 바람의 동요에 따른 전계센서의 흔들림에 의한 결과로 사료된다. 본 연구에서 제안된 전계센서의 경우 검출전극으로 평판형 전극을 사용하였으므로, 평판형 전극의 경우 방향

성에 매우 민감한 특성을 나타내게 된다. 즉 검출전극과 직교하는 전계 성분만을 주로 감지한다. 연산증폭기 및 전자부품의 동작온도는 -40°C - 105°C 이기 때문에 전자소자가 오동작할 확률은 거의 없다. 결론적으로 전계센서가 대기 불안정으로 바람에 의해 흔들림에 따라 평판형 전극의 감지 방향이 바뀌게 되어 비양하는 기구에 장착한 전계센서를 이용하여 검출전계신호가 진동의 양상을 나타낸 것으로 판단된다. 고도 6km 이상에서는 진동현상이 더욱 심하게 나타나는데, 이것은 구름이나 수분을 비롯한 대기상태가 더욱 불안정한 환경적 영향의 결과라고 사료된다.

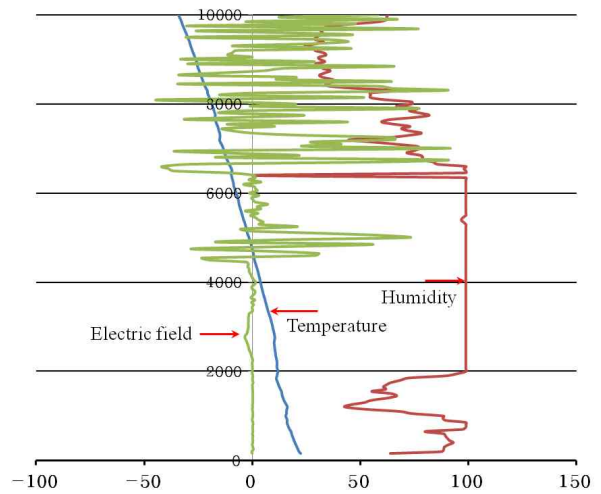


Fig. 8. Experimental results obtained from the balloon-carried E-field sensor

4. 결 론

본 논문에서는 뇌운에 의한 전계의 검출을 위해 능동성 적분기를 적용한 전계센서를 설계·제작하였으며, 교정실험과 비양실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① IEEE std-644 표준에 따른 교정장치를 구성하여 수행한 실험결과, 교정장치 내에 센서가 위치함으로 인해 형성된 불평등전계는 다소 전계센서의 검출감도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- ② 평판형 전극을 사용한 전계센서로서 응답감도의

선형성은 고도 4km까지 매우 우수하고, 대기전계의 검출이 가능한 측정시스템이 제안되었다.

- ③ 전계센서를 헬륨기구에 부착시켜 비양시킴으로써 간편하기 대기전계를 측정할 수 있는 기법임을 실증실험을 통해 확인하였다.
- ④ 전계센서를 비양기구에 장착하여 대기전계를 측정하는 경우 바람에 의해 전극의 방향이 고정되지 않고 흔들리게 되어 검출신호가 진동하는 것으로 나타났으며, 이의 해결하기 위한 방안을 연구할 필요가 있다. 또한 구름 속에 존재하는 수분의 영향과 높은 고도로 올라감에 따라 대기상태가 급격히 불안정한 상태로 됨을 고려하여 보다 안정적인 비양방법의 제안이 요구된다.

향후 고도 4km 이상에서 나타난 전계검출신호의 진동성 성분에 대한 명확한 원인의 분석과 대기전계의 정확한 측정을 위해서는 지속적인 연구가 필요하다. 본 논문에서 제시된 대기전계측정기법은 인공위성과 같은 우주발사체를 쏘아 올리는 때 대기상태의 분석 및 기상관측을 위한 수단으로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] B. H. Lee and S. C. Lee, Protection of Information and Communication Facilities against Lightning, The Publishing Department of Inha University, pp.38-47, 2004.
- [2] V. A. Rakov and M. A. Uman, Lightning - Physics and Effects, Cambridge University Press, pp.611-624, 2003.
- [3] D. S. Kim, B. H. Lee and D. K. Jeon, "Statistics of Casualties and Damage Caused by Lightning Strikes in Korea from 2000 to 2007", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol.23, No.7, pp.14-19, 2009.
- [4] J. G. Lee, "A study on the measurement of electric and magnetic field distributions near UHV overhead transmission lines and substations", MS thesis, Inha University, pp 4-10. 1996.
- [5] M. A. Uman, Lightning, Dover Publications, INC. New Work, pp.63-67, 1982.
- [6] G. S. Kil, J. Y. Song, I. K. Kim, J. W. Kwon, Ch. H. Ahn, and Y. K. Lee, "Design and Fabrication of a Field Mill for Ground-Level Electric Field Measurement", J. KIIEE, Vol.21, No.1, pp52-59, 2007.
- [7] Bok-Hee Lee, High Voltage and High Current Engineering, Chungmugak, pp. 184-196, 1993.
- [8] M. A. S. Ferro, J. Yamasaki, D. R. M. Pimentel, K. P. Naccarato, and M. M. F. Saba, "Lightning risk warnings

- based on atmospheric electrical field measurements in Brazil", J. Aerosp. Technol. Manag., Vol.3, No.3, pp.301-310, 2011.
- [9] M. M. F. Saba, O. Pinto Jr., I. R. C. A. Pinto, and O. Mendes Jr., "Stratospheric balloon measurements of electric fields associated with thunderstorms and lightning in Brazil", J. Geograph. Res., Vol.105, pp.18,091-18,097, 2000.
- [10] C. J. Biagi, M. A. Uman, J. Goparakrishnan, J. D. Hill, V. A. Rakov, and T. Ngin, "Determination of the electric field intensity and space charge density versus height prior to triggered lightning", J. Geograph. Res., Vol.116, pp.D15201-15, 2011.
- [11] K. A. Nicoll and R. G. Harrison, "A Lightweight balloon-carried cloud charge sensor", AIP Review of science instruments, Vol.80, pp.14501-4, 2009.
- [12] ANSI/IEEE Std. 644 "IEEE Standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines", pp.7-13, 1994.
- [13] J. D. Battles, "A balloon-borne instrument for measuring rapid electric vector changes in thunderstorms", MS. thesis, New Mexico institute of mining and technology, New Mexico, pp.30-37, 2005.
- [14] H. J. Choi, Circuit Analysis, Bokdoo Pub. Co. pp.201-235, 2013.
- [15] Korea Meteorological Administration, Notification No.2009-1, Standard for high layer meteorological observations, 2009.

◆ 저자소개 ◆



김승민(金承珉)

1985년 8월 22일생. 2011년 8월 인하대 자연과학대 물리학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : sm0822@inha.edu



이복희(李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1988~1989년 동경대학 객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~2011년 본 학회 회장. 현재 인하대 IT공대 전기공학과 교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr