

낙뢰에 의해 방사된 전기와 자기 파형의 파라미터

(Waveform Parameters of the Electric and Magnetic Fields Radiated Form Lightning Return Strokes)

이복희* · 백영환 · 이우철

(Bok-Hee Lee · Young-Hwan Baek · Woo-Chul Lee)

요 약

본 논문은 낙뢰에 의해서 방사된 전기와 자기 파형의 물리적 특성과 파라미터분석에 대한 것으로 낙뢰에 의한 전기와 자기 파형은 각각 평판형 전기센서와 루프형 자기센서로 검출되고, 측정된 신호는 12 비트의 해상도, 10[MS/s] 샘플링, 10[ms]의 기록시간을 가지는 데이터취득시스템으로 기록하였다. 낙뢰에 의해 발생한 전기와 자기 파형의 극성의존성은 거의 없었으며, 상승시간은 13[μ s]이내이고 정·부극성의 평균값은 각각 4.1[μ s], 4.2[μ s]이었다. 정·부극성의 영점교차시간은 각각 65.2[μ s], 67.0[μ s]이고, 반전딤의 깊이는 38.0%, 40.3%이었다.

Abstract

This paper deals with the physical properties and statistical analysis of waveform parameters of electric and magnetic fields radiated from lightning return strokes. The lightning electric and magnetic fields were detected by an plate-type electric field sensor and a loop-type magnetic field sensor respectively, and they were recorded by a data acquisition system having a resolution of 12bits, a sampling rate of 10[MS/s] and recording length of 10[ms]. As a result, a little difference between the parameters of electric and magnetic fields for positive and negative polarities was observed. The rise times of electric and magnetic fields were within the range of less than 13[μ s] and the average values for positive and negative polarities were 4.1[μ s] and 4.2[μ s], respectively. The average values of the zero-to-zero crossing times were 65.2[μ s] and 67.0[μ s], and the average depths of the dip to opposite polarity were 38.0% and 40.3%, for positive and negative polarities, respectively.

Key Words : Lightning return stroke, lightning electric and magnetic fields, waveform parameter, rise time, zero-to-zero crossing time

1. 서 론

* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2006년 2월 14일
1차심사 : 2006년 2월 16일
심사완료 : 2006년 3월 2일

최근 고성능 전자기기와 정보통신기술의 발달과 더불어 제조업, 행정 수송, 군수, 금융 등 모든 산업에 컴퓨터를 비롯한 자동화 설비가 급증하고 있다. 또한 기상이변에 기인하는 낙뢰의 발생빈도가 늘

낙뢰에 의해 방사된 전계와 자계 파형의 파라미터

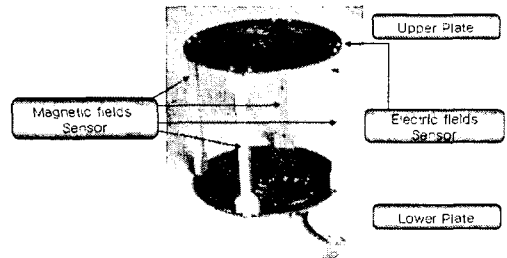
어나면서 인명피해는 물론이고 정보통신설비의 피해 역시 증가하고 있는 추세이다. 컴퓨터 및 초소형 전자기기는 건축물의 피뢰침에 낙뢰가 침입하거나 건축물 주변에 낙뢰가 발생할 경우 유도되는 유도 전압과 전자계에 의해 정보화시스템의 오동작, 손상 및 파괴로까지 이어지는 직접적인 피해와 설비 고장에 의한 생산율의 저하 등 간접적인 막대한 경제적 손실을 가져오는 사고의 발생으로 정보통신 설비 및 전자기기의 내뢰성능의 향상과 효과적인 뇌해 대책기술의 개발이 필요한 시기이다. 뇌방전은 전기적 현상을 기반으로 하는 자연현상으로 낙뢰에 의해서 발생하는 전계와 자계 파형에는 뇌방전의 진전과정, 뇌격전류의 극성과 크기 등 뇌방전에 관련된 여러 가지 정보를 내포하고 있어 이에 대한 연구가 중점적으로 이루어져 왔다[1-4]. 특히 미국에서는 케네디우주센터에서 뇌방전현상의 측정, 낙뢰위치표정, 뇌방전기구, 전력계통의 내뢰설계 등 뇌방전에 관한 연구의 선도적 역할을 하였으며, 일본, 스웨덴 등에서도 활성적인 연구가 진행되고 있다[5-6].

현재 우리나라에서는 뇌보호 대책수립에 대한 연구에 외국에서 측정된 데이터를 적용하는 실정으로 국내에서 발생된 뇌방전에 관한 연구 결과가 필요하고, 이의 연구 결과를 기초로 한 뇌보호 대책기술이 요망되고 있다. 낙뢰에 의해서 방사되는 전계와 자계는 주변의 전력선이나 통신선에 서지전압을 유도시키며, 전자유도장해를 일으키는 주요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 한반도 부근에서 발생하는 낙뢰에 의한 전계와 자계를 측정하여 이의 물리적 특성과 파라미터를 분석하여 뇌보호 대책의 연구에 적용될 수 있는 자료의 제공을 목적으로 낙뢰에 기인되어 방사되는 전계와 자계 파형을 정확하게 계측할 수 있는 측정시스템을 구성하였다. 2005년도 인천 부근에서 발생하는 낙뢰에 의한 전계와 자계 파형을 측정하였으며, 전계와 자계 파형의 상승시간, 영점교차시간, 반전답의 깊이 등의 파라미터를 통계적으로 분석하고, 이의 물리적 특성에 대하여 검토하였다.

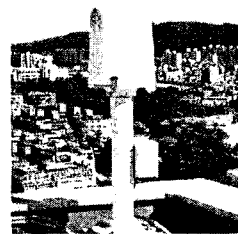
2. 측정시스템의 구성

2.1 전계센서와 자계센서

평판형 전계센서 및 루프형 자계센서의 실물사진을 그림 1에 나타내었다. 평판형 전계센서이므로 우천시 검출용 전극에 빗물이나 이물질의 침입을 방지하고, 바람과 일광 등에 의한 오염으로 손상되지 않도록 정전차폐가 되지 않는 비자성재료의 보호커버를 설치하였다.



(a) 전계와 자계센서



(b) 실장 센서의 사진

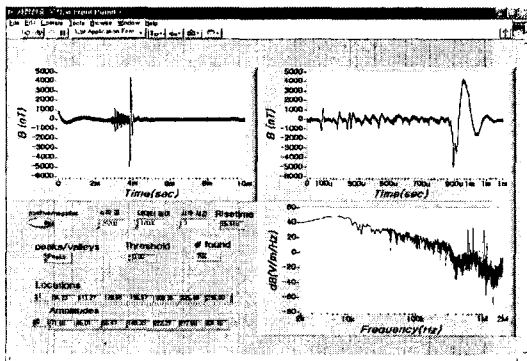
그림 1. 전계센서와 자계센서의 사진

Fig. 1. Photograph of the electric and magnetic fields sensor

전계센서는 직경 253[mm]의 원판형 검출전극과 접지전극 사이 3[mm]로 되어 있으며, 검출전극과 접지전극 사이의 정전용량 C 는 약 2.6[nF]이다. 자계센서는 한 변이 253[mm]이며, 자속쇄교면적 64,000 [mm²]를 갖는 4각형 루프센서로 되어 있다. 두 개의 루프센서를 직교로 배치하였으며, 각각의 루프센서는 6턴과 2턴으로 이루어져 다른 응답감도를 갖고 있다. 루프센서의 인덕턴스와 저항은 각각 21[μH]와 1.5[Ω], 3[μH]와 0.6[Ω]이다.

2.2 데이터취득시스템

본 전계와 자계측정시스템은 전계센서, 자계센서, 신호처리부, 데이터취득시스템(A/D converter, LabVIEW Program)으로 구성되어 있다. 그 중 데이터취득시스템은 PCI-6115 보드인 A/D Converter를 사용하였으며, 검출된 아날로그신호가 디지털신호로 변환된 신호는 LabVIEW프로그램을 통해 실시간 측정 및 저장이 가능하다. 12[bit] 분해능과 10[MS/s]의 샘플링 레이트를 가진 A/D 변환기를 사용하여 실시간 측정 및 저장하도록 하였다. 또한 데이터 기록시간을 10[ms]로 하여 뇌방전시 후속뇌격에 의해 발생하는 전계 및 자계를 한 이벤트 안에 측정할 수 있도록 하였다. 또한 낙뢰에 의해 발생한 전계와 자계를 자동으로 측정하고 저장한 후 언제라도 데이터를 재생시켜 분석할 수 있도록 하였으며, 관측된 파형과 분석프로그램의 예를 그림 2에 나타내었다.



위 : 관측파형

아래 : FFT분석

그림 2. 파형관측 및 분석프로그램
Fig. 2. Waveform observation and analysis program

낙뢰에 위해서 발생하는 자계 파형뿐만 아니라 전계 파형을 동시에 관측하여 뇌방전의 극성을 구분하여 분석할 수 있다. 낙뢰에 의해 발생한 전계 파형으로부터 낙뢰의 극성을 판별하고, 정극성과 부극성 낙뢰에 대한 전계와 자계 파형의 특징 및 파라미터에 대해 통계적 분석을 하였다.

2.3 측정시스템의 전체 구성도

상용 전원 60[Hz]의 전자기파 영향을 최소화하기 위해 검출용 센서를 인하대학교 15층 건물의 옥상 16층에 설치하였다. 전계와 자계 검출용 센서에서 데이터취득시스템까지는 약 40[m]정도 떨어져 있으며, 검출된 신호는 특성임피던스가 50[Ω]인 동축케이블을 통하여 전송되며, 측정시스템의 개략도를 그림 3에 나타내었다.

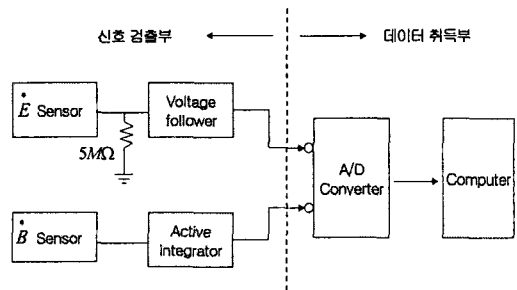


그림 3. 측정시스템의 개략도
Fig. 3. Block diagram of the measuring system

신호처리부인 전계센서의 전압신호전송기(voltage follower)로는 입력임피던스가 약 10^{12} [Ω]으로 대단히 크며, 응답속도가 12[V/μs]인 연산증폭기 LF356을 사용하였으며, 자계측정용 능동성 적분기(active integrator)로는 응답속도가 1200[V/μs]로 매우 높고, 주파수 대역이 220[MHz]인 연산증폭기 LM7171을 사용하여 차동증폭과 적분이 동시에 이루어지도록 하여 루프센서로 검출된 미분신호를 실신호로 변환시켰다[7].

3. 결과 및 고찰

3.1 뇌전자계 파형의 특성

낙뢰의 진전은 초기방전과정에 의해 리더가 형성되며, 계단상으로 진전하여 최종단계에 귀환뇌격으로 이어진다. 낙뢰가 발생할 때 계단상 리더의 진전과 귀환뇌격에 대한 전계 파형의 대표적인 예를 그림 4에 나타내었다. 관측된 파형은 뇌방전 발생한 때의 뇌운의 규모, 진전경로, 뇌격거리 등에 따라 약간

낙뢰에 의해 방사된 전계와 자계 파형의 파라미터

씩 다르게 나타났으며, 대부분 그림 4에 나타낸 바와 같은 형상으로 나타났다. 낙뢰에 의해 발생하는 전계와 자계 파형은 뇌격지점과 관측지점 사이의 거리에 따라 다르게 된다. 특히 뇌격지점과 관측지점 사이의 거리에 따라 전계와 자계 파형의 파미특성이 변화하게 되며, 원거리 낙뢰에 의해서는 주로 방사 성분만이 검출되므로 전계와 자계 파형은 거의 같은 모양으로 된다.

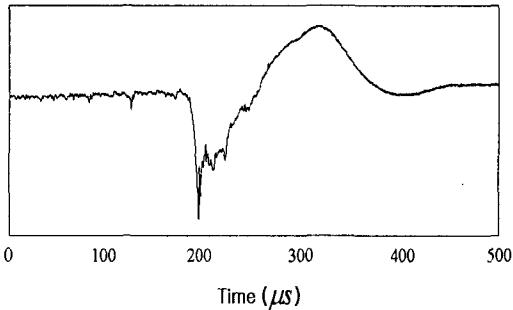


그림 4. 낙뢰에 의해 발생된 대표적인 전계 파형
Fig. 4. Typical waveform of the electric field radiated from lightning return strokes

낙뢰에 의해서 방사되는 전계와 자계 파형의 파두 부분의 특징은 초기에 서서히 상승하는 부분과 그 후의 급상승하는 부분으로 분류된다. 서서히 상승하는 부분은 부착과정 동안에 발생한 완만한 기울기를 가지는 파두부분이다. 급상승하는 부분은 대기로부터 귀환뇌격전류에 의한 것으로 급격한 기울기를 가진 피크가 발생하며 상승시간은 수백 [ns] 정도이다. 이와 같이 낙뢰에 의해서 방사되는 전계와 자계 파형에서 급상승하는 것은 뇌격전류의 변화에 대응하는 것으로 전자파의 전파경로의 특성임피던스에 의존하게 된다[4].

3.2 전계와 자계 파형의 파라미터

뇌방전 현상과 관련된 전기적 특성의 해석에 있어서 공간 전계와 자계 파형의 각종 파라미터를 파악하는 것은 낙뢰에 의해 유도되는 서지전압의 영향을 방지하고, 이에 대한 대책수립 측면에서 대단히 중요하다. 낙뢰에 의해 발생된 전계와 자계 파형의 변

동은 이의 방사원인 뇌격전류와 직접적인 관련성을 가지고 있다[3-4].

낙뢰에 의한 전계와 자계 파형의 특성은 상승시간, 영점교차시간, 반전딯 깊이 등의 여러 가지 파라미터에 의하여 분석되며, 이들 파라미터는 낙뢰지점 위치로부터 검출용 센서까지의 거리에 따라 변화한다. 낙뢰에 의해서 발생하는 전계와 자계 파형은 거리에 따라 변화할 뿐만 아니라 계절, 지형적 조건 등 여러 가지 요인에 의해서 변화하므로 우리나라의 주변에서 발생하는 낙뢰에 의한 전계와 자계 파형의 특징을 분석하는 것은 대단히 중요하다.

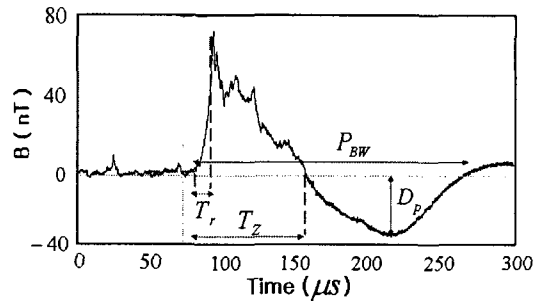


그림 5. 낙뢰에 의해 발생된 전자계 파형의 파라미터에 대한 정의
Fig. 5. Definition of parameters of the electric and magnetic field waveform radiated from lightning return strokes

낙뢰에 의해서 발생하는 전계와 자계 파형의 파라미터에 대한 정의를 그림 5에 나타내었다. 파두의 상승시간, 파형의 시작점에서 영점교차까지의 시간, 첫 번째 피크에 대한 영점교차 후 반대 방향으로의 피크비 등의 파라미터로 특징을 나타낼 수 있다. 전계와 자계 파형의 파두의 특성을 나타내기 위하여 파형의 최대치의 10[%]에서부터 90[%]까지 걸리는 시간이 파두부의 상승시간(rise time : T_r)이다. 영점교차시간(zero-to-zero crossing time : T_z)은 파형의 시작점에서부터 극성이 바뀌는 시점까지 걸리는 시간을 나타내는 파라미터이고, 파미의 특성을 나타내는 반전딯의 깊이(depth of the dip : D_p)는 파형의 제 1의 피크값에 대한 반대극성의 피크값의 비율을 나타낸다.

낙뢰에 의해 발생된 전계와 자계 파형의 데이터를

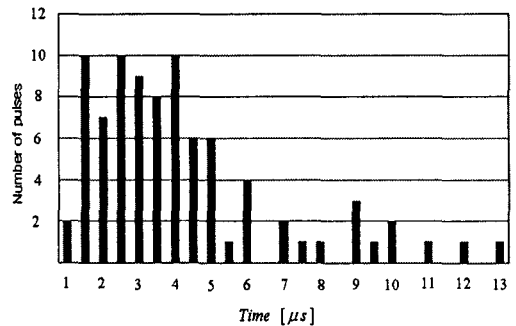
살펴보면 정극성 낙뢰는 부극성 낙뢰의 5[%]정도로 나타났으며, 정극성 귀환뇌격에 의해 발생된 전계와 자계 파형의 데이터 수는 비교적 적어 분석대상에서 제외시켰다.

3.3 전계와 자계 파형 파라미터의 비교

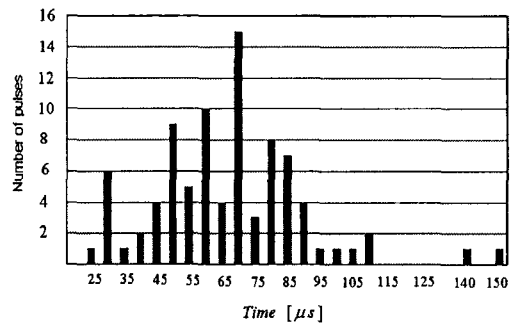
낙뢰에 의해 발생된 전계와 자계 파형은 뇌운의 규모나 경로 그리고 뇌격지점과 관측지점까지의 거리에 따라서 약간씩 다른 파형으로 관측되고 형상은 동일하지 않았지만, 대체적으로 그 패턴은 거의 비슷하게 나타났다. 낙뢰에 의하여 발생하는 전계와 자계 파형은 뇌격지점과 관측지점 사이의 거리 합수로 표현되며 약 50[km] 이상의 원거리에서 발생된 전계와 자계 파형은 거의 방사성분만이 관측된다 [1],[8]. 또한 근거리에서 낙뢰가 발생할 경우 전계 파형의 성분 중에 정전계 성분이 포함되어 나타나므로 전계와 자계 파형의 형태가 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 50[km]이상의 원거리에서 발생한 것으로 추정되는 전계와 자계 파형을 주된 분석 대상으로 하였다. 낙뢰에 의해 발생된 전자계 파형은 부극성 86개 파형, 정극성 4개 파형으로 정극성의 경우 데이터로 활용하기에는 너무 적은 데이터 수로 판단되어 분석하지 않았다. 그림 6과 그림 7에 낙뢰에 의해 발생된 전계와 자계 파형의 파라미터 분포에 대한 결과를 나타내었다.

낙뢰에 의해 발생된 전계 파형의 상승시간, 영점 교차시간과 반전딴의 깊이의 분포를 그림 6에 나타내었다. 귀환뇌격과정 동안에 발생한 전계와 자계 파형의 상승부분은 선행리더의 대기와의 접촉에 의해 이루어지는 완만히 상승하는 부분과 피크 부근에서의 급격하게 상승하는 부분으로 구성되는 것을 볼 수 있다. 상승시간은 뇌보호장치의 응답 특성에 직접적으로 영향을 미치게 되므로 뇌보호장치의 설계에 있어 대단히 중요한 요소가 된다[9]. 상승시간의 경우는 1~13[μ s]의 분포를 나타내었으며, 평균 4.2[μ s]으로 나타났다. 영점교차시간은 귀환뇌격이 지속되는 시간의 정도로 나타내는 파라미터로 뇌격에 의해서 대지로 전달되는 전하량 또는 에너지에 대한 평가요소이며, 뇌격지점과 관측지점 사이의 거리의

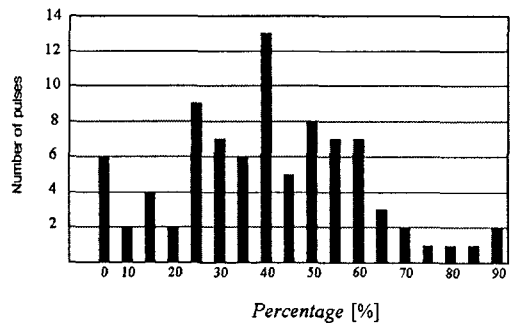
존성을 가지게 된다. 영점교차시간의 평균은 67[μ s]를 나타내었다. 또한 반전딴의 깊이는 파미의 특성을 나타내는 것으로 낙뢰에 의해 소멸되는 전하량에 관계되며, 거리의존성을 나타내게 된다. 원거리의 낙뢰의 경우는 반전딴의 깊이가 크게 나타나며, 근거



(a) 상승시간



(b) 영점교차시간

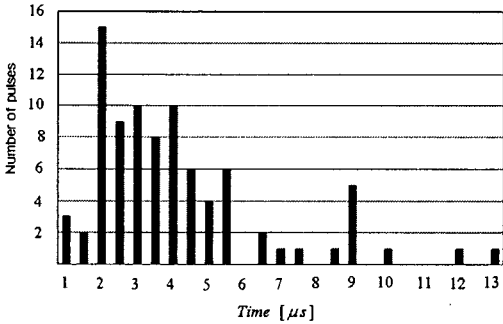


(c) 반전딴의 깊이

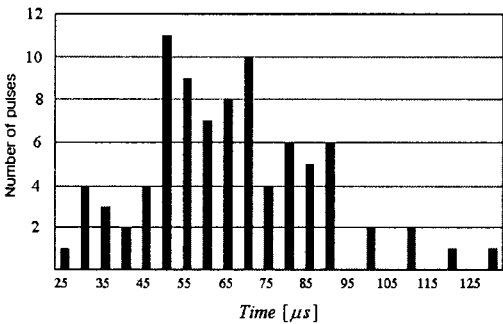
그림 6. 전계 파형의 파라미터 분포
Fig. 6. Histograms of the parameters of electric field waveforms caused by lightning return strokes

낙뢰에 의해 방사된 전계와 자계 파형의 파라미터

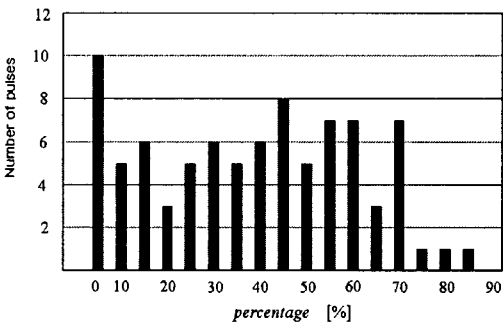
리의 낙뢰의 $I_s = \frac{k_s}{\sqrt{t}}$ [A] 경우는 반전딴 깊이가 작게 나타난다. 반전딴 깊이의 경우 0~90[%]의 고른 분포를 보였으며, 평균 40.3[%]의 반전딴의 깊이를 나타내었다.



(a) 상승시간



(b) 영점교차시간



(c) 반전딴의 깊이

그림 7. 자계 파형의 파라미터 분포
Fig. 7. Histograms of the parameters of magnetic field waveforms caused by lightning return strokes

낙뢰에 의해 발생된 자계 파형 파라미터의 통계적 특성을 그림 7에 나타내었다. 상승시간은 1~13[μs]의 분포를 나타내었으며, 평균 상승시간은 4.1[μs]이다. 또한 영점교차시간은 25~130[μs]의 분포를 가지며, 평균 65.2[μs]이었다. 반전딴의 깊이는 0~85[%]까지 분포되어 있었으며, 평균 38[%]이다. 자계 파형의 파라미터가 대부분 전계 파형의 값과 비슷한 분포를 가지는 것으로 보아 방사성분이 지배적인 것이라고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 낙뢰에 의해서 발생하는 전계와 자계 파형을 측정할 수 있는 측정시스템을 구성하였으며, 낙뢰에 의해 발생하는 전계와 자계를 측정하고 이들 파형의 파라미터를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

파형기록시간이 10[ms]인 데이터취득시스템을 이용하여 선행리더를 비롯하여 최초뇌격과 후속뇌격에 의해 발생하는 전계와 자계 파형을 측정할 수 있으며, LabVIEW분석프로그램으로 전계와 자계 파형의 파라미터를 정확하게 분석하였다. 낙뢰에 의해 발생된 전계와 자계 파형의 상승시간은 약 4.1[μs], 영점교차시간은 평균 66[μs], 반전딴의 깊이는 약 40[%]로 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 앞으로 낙뢰에 의해서 발생하는 전계와 자계의 계절적 특성에 대한 지속적 연구가 요망되며, 본 연구에서 제안된 과도전계와 자계측정시스템은 뇌방전현상의 전기적 특성을 비롯한 과도전자계현상에 관한 실증적 연구에 활용될 것으로 기대된다.

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업에 의해 작성되었습니다.

References

- [1] C. D. Weidman, E. P. Krider, "The Fine Structure of Lightning Return Stroke Waveforms", J. Geo. Res., Vol.83, No.C12, pp. 6239-6247, 1978.
- [2] W. Beasley, M. A. Uman and P. L. Rustan, "Electric Fields Processing Cloud-to-Ground Lightning Flashes", J. Coe., Res., Vol.87, No.C7, pp. 4883-4902, 1982.

- [3] C. Leteinturier, J. Hamelin and C. Weidman, "Correlation of Lightning Current and Electric Field Derivative", 8th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, pp. 405~410, 1989.
- [4] Y. T. Lin, M. A. Uman and R. B. Standler, "Lightning Return Stroke Models", J. Geo. Res., Vol.85, No.C3, pp. 1571~1583, 1980.3.
- [5] M. Ishii and J. Hojo, "Statics on Fine Structure of Cloud-to-Ground Lightning Field Waveforms", J. Geo. Res., Vol.94, No.D11, pp. 267~274, 1989.
- [6] V. Cooray and S. Lundquist, "Characteristics of the Radiation Fields from Lightning in Sri Lanka in the tropics", J. Geo. Res., Vol.90, No.D4, pp. 6099-6109, 1985.
- [7] 이복희, 이우철, "운방전에 의해서 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터 분석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.20, in press. M. A. Uman and E. P. Krider, "A Review of Natural Lightning : Experimental Data and Modeling", IEEE Trans., Vol.EMC-24, No.2, pp. 78~105, 1982.
- [8] 石井 勝 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B, Vol.108, No.4, pp. 28~35, 1988.
- [9] Bok-Hee Lee, Ju-Hong Eom, Sung-Man Kang, Seung-Kwon Paek and Tatsuo Kawamura, "Characteristics of the Radiation Field Waveforms Produced by Lightning Return Strokes", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No.7A, pp.4379-4385, 2004.

◇ 저자소개 ◇

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 부회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

백영환 (白英煥)

1959년 12월 8일생. 2002년 2월 서울산업대학교 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 산업대학원 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)875-1276

E-mail : sky4u6006@hanmail.net

이우철 (李雨澈)

1978년 6월 12일생, 2004년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : wclee97@naver.com