

## Measurement and Statistical Analysis of Magnetic Fields Produced by Cloud Discharges

李福熙<sup>†</sup> · 吉亨准<sup>\*</sup> · 趙成哲<sup>\*\*</sup> · 沈應輔<sup>\*\*\*</sup> · 禹貞旭<sup>\*\*\*</sup>

(Bok-Hee Lee · Hyoung-Jun Gil · Sung-Chul Cho · Eung-Bo Shim · Jung-Wook Woo)

**Abstract** - In this work, to obtain the detailed information about lightning electromagnetic field waveforms, the LabVIEW based-measurement system of time-changing magnetic fields was designed and constructed. The frequency bandwidth of the magnetic field measuring system ranges from 300 [Hz] to 1 [MHz], and the response sensitivity is 2.78 [mV/nT]. Data acquisition system with the resolution of 12 bits and memory capacity of 32 [Mbyte] was triggered by the magnetic field to be measured. The properties and parameters of the magnetic fields produced by cloud discharges were statistically investigated. The magnetic field waveforms radiated from cloud lightning discharges tend to be bipolar, with two or more narrow and several pulses superimposed on the initial front part. The recording length of the magnetic field measurement system is about 10 [ms]. The mean duration of cloud discharges is 1.3 [ms], and the number of outburst pulses for the period is 8 in average. The front times of the magnetic fields are 6.15 [ $\mu$ s] in average. The zero-to-zero crossing times that is the initial half-cycle duration is widely dispersed and the mean value is 9.61 [ $\mu$ s], and the mean value of percentage depth of dip to opposite polarity is 41.1 [%].

**Key Words** : Lightning, Cloud Discharges, Magnetic Field, Rise Time, Zero-Crossing Time

### 1. 서 론

최근에는 초소형 고속 반도체 소자의 출현으로 초고밀도의 집적회로를 사용하는 전자기기의 개발과 이의 이용이 일반화되면서 고속철도 운전제어기의 오동작 유발과 같은 뇌방전에 의한 전자파 피해가 새로운 사회문제로 대두되었다. 여러 가지 정보화기기의 보급으로 전력계통의 신뢰도 향상이 한층 더 요구되고 있으며, 전력계통설비에서도 전력통신 설비의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 뇌방전에 의한 전자장 펄스에 의한 사고와 오동작 등의 피해를 줄이기 위해서는 사고의 발생원인, 뇌방전에 의해서 발생하는 전자장 펄스의 상승시간, 감쇠시간, 영점교차시간 및 시간적 변화율 등 각종 파라미터 특성을 파악하는 것이 필요하다. 운방전에 의하여 발생하는 자장 신호에는 뇌격위치, 뇌격전류의 파형과 강도 등 여러 가지 파라미터에 관한 정보가 포함되어 있기 때문에 이를 정확하게 측정하고 평가하는 것은 뇌방전의 진전형태에 관련된 학술적인 측면뿐만 아니라 공학적 응용에서도 대단히 중요하다.[1-3]

EMI/EMC 측면에서 보면 운방전에 의해서 고주파 성분의 강력한 전자파가 발생하므로 이에 대한 원인의 분석과 대책에 관한

연구가 필요하다.

특히 최근 뇌방전에 의해서 방사되는 뇌전자펄스 (lightning electromagnetic pulses: LEMPs)에 의해서 전자회로에 뇌서지 전압이 유도되어 전자기기의 파손이나 오동작을 초래하는 장애가 늘어나면서 이 분야에 대한 연구의 관심이 집중되기 시작하였다. 그러나 이 분야에 관련하여 아직 명확한 연구 성과는 발표되고 있지 않았으나 가장 강력한 뇌전자장펄스는 운방전에 의해서 발생하는 것으로 보고되어 있다.

뇌방전에 의하여 방사되는 자장 파형의 검출에는 루프형 안테나인 방향탐지기(DF)를 이용하였다. LabVIEW 프로그램을 이용하여 측정 파형의 신뢰성과 효율성을 높일 수 있는 분석 프로그램을 자체 제작하여 전체 뇌방전에 의해 발생한 자장 파형을 측정하고 분석하였다. 특히 운방전에 의하여 발생하는 자장 파형이 주로 관측되어 자장 파형의 상승시간과 영점교차시간 등에 대한 특성을 통계적으로 분석하고, 다른 연구자의 측정결과와 비교·검토하였다.

### 2. 측정시스템의 구성 및 방법

뇌방전에 의하여 발생하는 자장을 검출하기 위해서 맥스웰의 전자방정식에 의해 동작하는 루프형 센서를 이용하였다. 측정시스템에는 검출된 신호를 원래의 신호로 복원시키기 위해 차동증폭기와 능동형 적분기를 구성하여 적용하였다. 데이터취득시스템은 분해능이 12bit인 A/D 변환기를 사용하였다. LabVIEW 프로그램을 이용하여 PCI보드를 제어하면서 센서로 측정된 신호를 컴퓨터 모니터에 출력하였고, 분석프로그램을 이용하여 컴퓨터에 저장된 신호의 크기, 상

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 仁荷大學 電子·電氣工學科 教授  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 仁荷大學 電氣工學科 博士課程

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 기초전력연구원

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 전력연구원

接受日字 : 2005年 1月 10日

最終完了 : 2004年 4月 1日

승시간, 펄스폭, 영점교차시간을 분석하였다. 측정계의 전체 흐름도를 그림 1에 나타내었다.

루프형 자장센서로는 미국 LLP사의 낙뢰위치표정장치에 포함되어 있는 방향탐지기(direction finder: DF)의 검출기를 사용하였다. 루프형 센서는 한 변의 길이가 250 [mm]이고 감긴수 6회이며, 자체 인덕턴스와 저항은 각각 21 [ $\mu$ H], 1.5 [ $\Omega$ ]이므로 뇌방전시 발생하는  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  [T] 정도의 자속밀도를 충분히 감지할 수 있다. 신호처리부는 센서의 미분검출신호를 증폭시키고 원래의 신호로 복원하는 적분기로 구성되어 있으며, LM7171 연산증폭기를 사용하였다. 또한 데이터 취득 및 분석시스템으로는 개인용 컴퓨터에 LabVIEW에서 프로그램된 구동소프트웨어를 이용하였다.

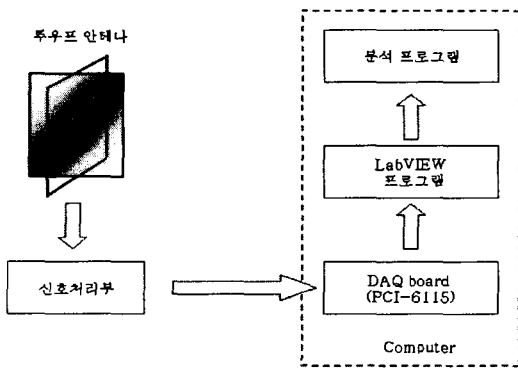


그림 1. 자장 측정시스템의 개요도  
Fig. 1. Flow chart of the magnetic field measuring system

루프형 센서는 주변의 철구조물의 영향을 받지 않는 인하대학교 15층 건물의 옥상에 설치하였다. 신호처리부는 연산증폭기(LM7171)를 이용하여 차동증폭과 적분 회로를 구성하였으며, 60 [Hz]의 노이즈 성분은 LabVIEW 프로그램에서 지원하는 필터에 의해 제거된다. 데이터취득 시스템에 사용되는 A/D 변환기는 10 [MS/s]의 샘플링율을 갖고, 최대 100 [ms]의 시간영역 동안 신호를 처리할 수 있다.

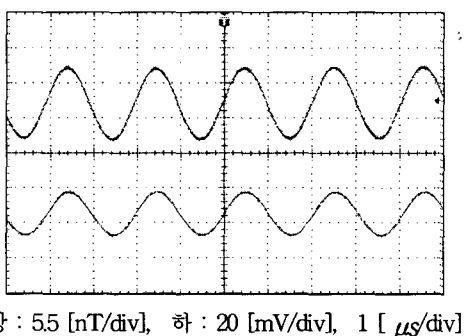


그림 2. 정현파 입력에 대한 응답 파형  
Fig. 2. Response waveforms of the magnetic field measuring systems to a sinusoidal input

A/D 변환기의 제어는 자체 제작한 LabVIEW 프로그램을 통하여 이루어진다.[5, 6] 루프형 자장센서를 이용한 자장측

정시스템의 고유응답특성 즉, 센서를 포함한 측정계의 응답 감도와 주파수대역등의 기본성능을 파악하기 위해서 정현파 신호에 대한 교정실험을 수행하였다.[7]

그 결과 주파수대역은 300 [Hz]~1 [MHz]이고, 응답감도는 2.78 [nT/mV]로 광대역이며 미세한 뇌방전에 의한 자장 신호를 충분히 감지할 수 있다. 또한 데이터 기록은 10 [ms]이다. 미지의 자속 또는 자속밀도의 측정을 위해서는 감도교정이 필요하므로 기지의 정현파 입력에 대한 측정계의 응답특성을 평가하였으며, 500 kHz 정현파 입력 자속에 대한 출력의 응답파형 예를 그림 2에 나타내었다.

관측된 데이터를 분석하기 위해서 컴퓨터 하드디스크에 저장되어 있는 데이터를 다시 불러들여 원하는 시간영역에서의 확대와 수치적분, 그리고 FFT를 할 수 있는 분석 프로그램을 작성하였으며, 관측된 자장파형의 예를 그림 3에 나타내었다.

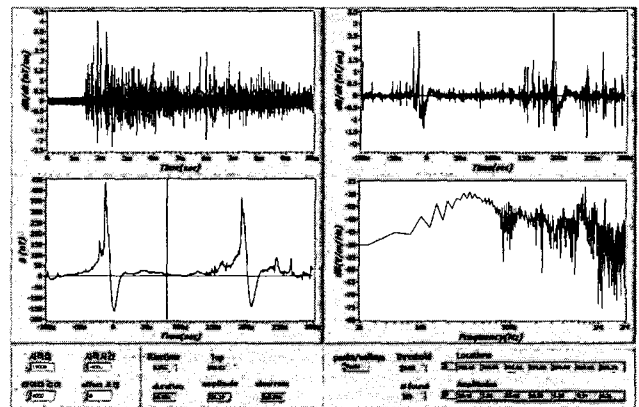


그림 3. 관측된 자장파형의 예  
Fig. 3. Example of the observed magnetic field waveform

LabVIEW 프로그램 내부에서 지원하는 함수들을 이용하여 상승시간, 피크값등의 자장신호 파라미터를 구할 수 있으며 필요한 시간영역에서의 특징값은 커서를 이용하여 좌표와 크기에 대한 값을 서로 연산하여 구할 수 있는 기능을 가지고 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 운방전에 의해 발생한 자장 파형의 특성

낙뢰와 운방전에 의해 발생하는 자장 파형의 대표적인 예를 그림 4에 나타내었다. 운방전에 의한 자장 파형은 파두부에서 빠른 상승시간을 가지며, 양극성(bipolar) 진동파형으로 나타나고, 커다란 펄스가 중첩되는 형태를 가지는 것이 특징이다. 이러한 양극성 자장 신호는 뇌운 내에 존재하는 정전하와 부전하가 리더에 의해 서로 만나 재결합에 의한 소멸과정의 반복적인 특징이라고 생각된다. 그림 3 (b)의 경우와 같이 피크에 이르기 전에 미세한 펄스들이 중첩되기도 하며 피크 후에 펄스들이 중첩되는 경우도 있다.

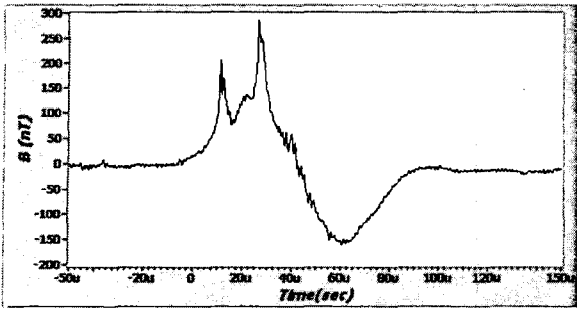
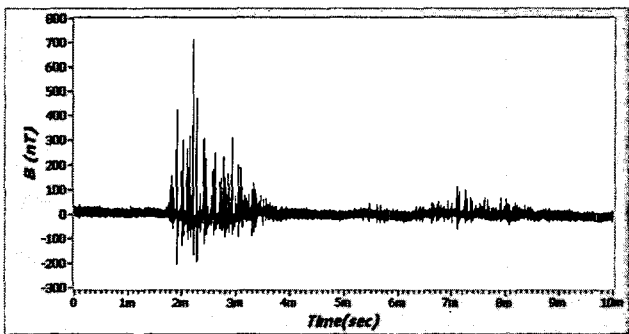
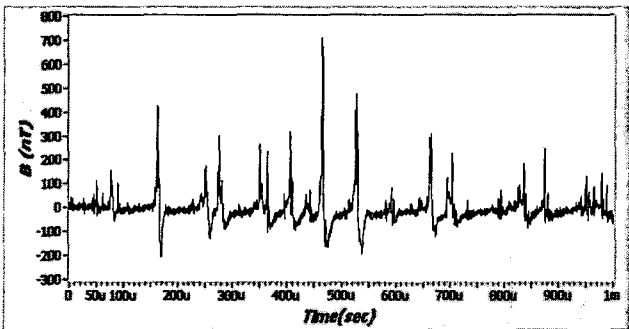


그림 4. 운방전에 의해 발생하는 자장 파형의 예  
Fig. 4. Example of the magnetic field waveforms produced by cloud discharges

또한 운방전이 발생하여 종료되기까지의 시간은 낙뢰의 경우보다 짧으며, 고주파성분의 미세한 펄스를 포함하고 있으므로 방사성분이 주로 나타난다. 2004년 10월 인천지역에서 발생한 운방전에 의해서 방사되는 자장 파형을 관측한 대표적인 예를 그림 5에 나타내었다.



(a) 관측된 자장파형



(b) (a)의 확대파형

그림 5. 운방전에 의한 자장 파형의 예  
Fig. 5. Examples of the magnetic field waveforms produced by cloud discharges

전체 관측시간은 프리트리거(pre-trigger) 시간을 포함해서 10 [ms]이며, 트리거는 2 [ms] 위치에서 이루어졌다. 선행연구에 적용했던 전자장계측시스템은 관측 가능한 시간영역이 500 [ $\mu$ s] 이하이었던 점을 감안한다면, LabVIEW를 이용한 새로운 관측시스템은 보다 긴 10 [ms]이상의 시간영역

동안 자장파형을 관측할 수 있다. 이는 부분적인 시간영역에서 관측된 자장 파형을 해석하는 것에서 벗어나 운방전 현상의 전체 과정을 관측하여 보다 넓은 시간영역에 대한 자장 파형을 분석할 수 있는 장점을 가지게 된다. 그림 4 (b)는 관측된 전체 파형인 그림 6 (a)에서 운방전이 발생된 부분만을 확대시킨 그림이며, 이를 통하여 운방전은 1 [ms] 이상의 시간동안 진행되었음을 알 수 있다.

### 3.2 운방전의 지속시간과 펄스개수 분포

그림 5를 바탕으로 총 20개의 샘플 자장 파형을 분석한 결과, 운방전의 전체 지속시간 분포를 그림 6에 나타내었다.

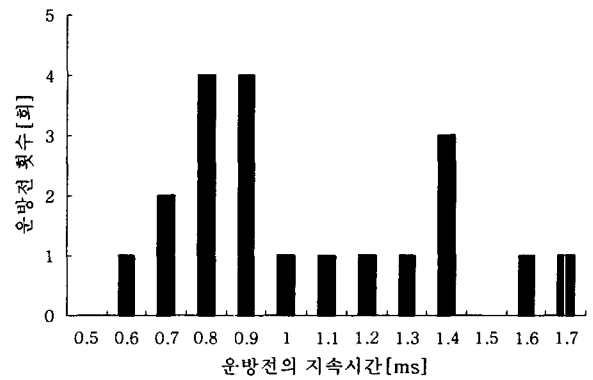


그림 6. 운방전 지속시간의 분포  
Fig. 6. Histograms of the duration of cloud discharges

그림 6에서 운방전의 지속시간은 0.6 [ms]부터 1.7 [ms]까지 넓은 영역의 시간 분포를 갖는 것을 알 수 있다. 평균 지속시간은 평균 1.3 [ms]이다. 측정된 데이터 중에는 지속시간이 약 100 [ $\mu$ s] 정도의 단발성 운방전이 있는 반면에, 5 [ms]이상 유지되면서 많은 펄스를 동반하는 운방전도 있는 것을 확인하였다.

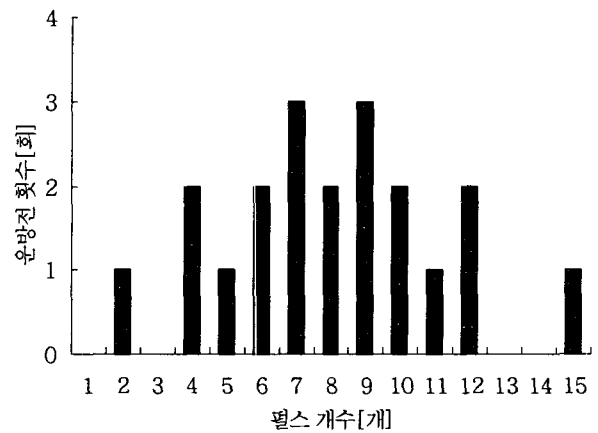


그림 7. 운방전에 의한 전자장 펄스 개수의 분포  
Fig. 7. Histograms of the number of electromagnetic field pulses produced by cloud discharges

이는 뇌운에 충전되어 있는 전하의 양과 진전경로에 직접적인 관련이 있는 것으로 판단되고, 또한 계절에 따라 운방전의 지속시간은 많은 차이를 보일 것으로 생각된다. 더불어 운방전이 진행되는 시간동안 방전의 양상과 특성을 알아보기 위하여 전자장 펄스의 개수를 분석하였으며, 이의 결과를 그림 7에 나타내었다.

운방전이 발생하는 시간 영역동안 최대크기펄스 값의 25%이상의 값을 갖는 것만을 평가하였다. 이는 귀환뇌격 판정기준에서 전구 방전의 리더 피크값과 측정 상에서 나타날 수 있는 노이즈의 값을 고려하여 최대값의 25% 값을 선정하였다. 총 20개의 운방전에 의해 발생한 자장 파형을 분석한 결과 한 번의 운방전 발생시 평균 8개의 펄스가 발생하는 것으로 분석되었다. 뿐만 아니라 최대값의 33%이상이 되는 펄스는 평균 5.4개, 최대값의 50%이상이 되는 펄스는 평균 3개가 나타났다. 따라서 뇌운에 충전되어있는 전하는 평균 8번의 방전과 평균적으로 세 번의 큰 방전을 통하여 운방전이 이루어진다는 것을 알 수 있다.

**3.3 운방전에 의한 자장파형 파라미터의 통계**

운방전에 의하여 방사된 자장 파형의 대부분이 일련의 펄스 형태로 나타났으며, 운방전에 의해서 발생하는 자장 파형은 방전의 진전형태와 규모에 따라 다르지만 그 양상은 뚜렷하게 나타났다. 전구방전에 의한 선행 리더 펄스의 시간간격, 운방전시에 나타나는 자장 파형의 파두부분의 중첩펄스의 시간간격, 영점교차후 반대 방향 펄스의 피크비, 주 방전 이후에 발생된 후속뇌격 사이의 시간간격과 피크비 등의 특성을 나타내는 파라미터에 대한 통계적 분석에 대한 연구 보고는 이미 이루어진 바가 있다.[8]

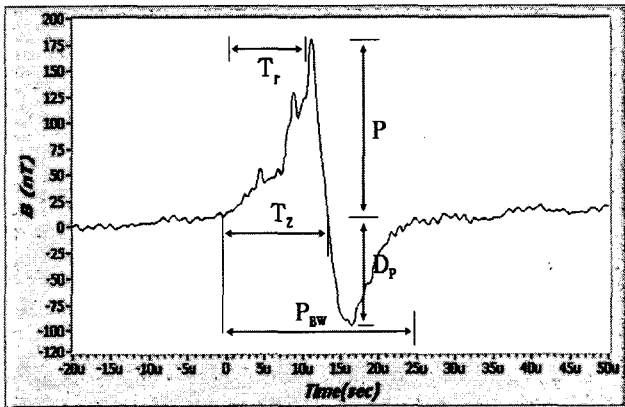


그림 8. 운방전에 의한 자장 파형 파라미터의 정의  
 Fig. 8. Definition of the parameters of the magnetic field waveforms produced by cloud discharges

뇌방전에 의해 발생한 자장 파형의 상승시간, 영점교차시간, 펄스폭, 백분율 반전딥 깊이 자장파형의 형상등의 파라미터에는 뇌방전전류의 크기와 파형, 뇌방전 진전양상, 뇌방전에 의한 유도전압의 크기와 주파수 성분 등 뇌방전의 물리적 성질과 특성에 관한 정보가 포함되어 있으므로 본 연구에서는 이들 자장파형의 형상파라미터를 통계적으로 분석

하였다. 그림 8은 운방전에 의한 자장 파형의 파라미터를 정의하기 위해서 그림 5에 나타낸 자장 파형 중의 임의의 한 펄스를 빠른 시간 영역으로 하여 나타낸 것이다.

그림 8에서  $T_z$ 는 운방전의 영점교차시간,  $P_{bw}$ 는 운방전의 전체 펄스폭,  $D_p/P$ 는 운방전의 반전딥 깊이를 나타낸다. 자장 파형의 파두부분의 특징은 10~90 [%] 상승시간(rise time;  $T_r$ )으로 하였다. 운방전에 의해 방사된 자장 파형에 대해 데이터 30개를 분석하였으며, 노이즈 성분이 심하거나 판독이 불분명한 데이터는 분석 대상에서 제외시켰다. 분석 작업은 LabVIEW 프로그램으로 자체 제작한 분석프로그램을 이용함으로써 오차를 최소화 할 수 있다. 운방전에 의한 자장 파형의 상승시간 분포를 그림 9에 나타내었다.

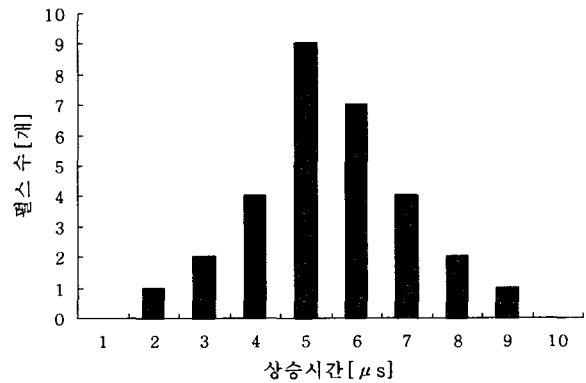


그림 9. 운방전에 의한 자장 파형의 상승시간 분포  
 Fig. 9. Histograms of the rise time of magnetic field waveforms produced by cloud discharges

운방전에 의한 자장 파형의 평균 상승시간은 6.15 [ $\mu s$ ]이며, 표준편차는 1.67 [ $\mu s$ ]로 대부분의 시간 분포가 평균값 가까이 모여 있다. 낙뢰에 의한 자장 파형의 상승시간의 평균치는 3.09 [ $\mu s$ ]에 비하여 운방전에 의한 자장 파형의 상승시간이 두 배 정도 긴 것을 알 수 있는데, 그 이유는 낙뢰와 운방전의 발생 메커니즘의 차이라고 판단되어진다.[10]

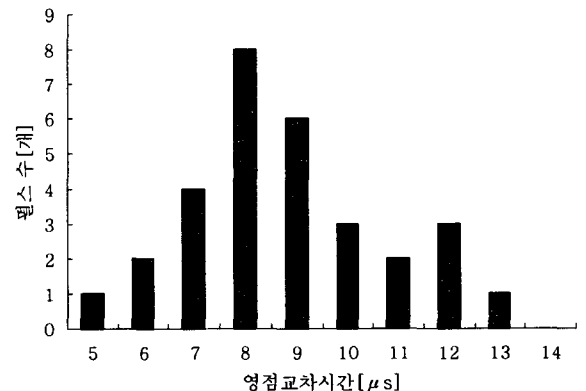


그림 10. 운방전에 의한 자장 파형의 영점교차시간 분포  
 Fig. 10. Histograms of the zero crossing time of magnetic field waveforms produced by cloud discharges

운방전에 의한 자장 파형의 영점교차시간 분포를 그림 10에 나타내었다. 영점교차시간은 거리의 의존성을 가지며, 방사성분의 자장 파형이 주로 분석대상이었다. 운방전에 의한 자장 파형은 평균 9.61 [μs]의 영점교차시간을 나타냈으며, 표준편차는 2.15 [μs]을 보였다. 선행연구에서 보고된 자장 파형의 영점교차시간은 12~19 [μs]로 차이를 보이고 있는데, 이는 운방전 동안에 2~3개의 미세한 펄스들이 겹쳐서 발생하기 때문에 중첩정도에 따라 영점교차시간의 차이가 발생한 것으로 보인다.[9]

운방전에 의해 발생한 자장 파형의 영점으로부터 펄스의 피크를 지난 후 역극성의 피크치를 지나 나타나는 영점까지의 시간을 운방전의 펄스폭으로 규정하였고, 이에 대한 결과를 그림 11에 나타내었다. 운방전에 의한 자장 파형의 펄스폭은 평균 21.94 [μs]이며, 표준편차는 5.84 [μs]로 나타났다. 선행연구에서 발표한 자장 파형의 전체 펄스폭인 25~36 [μs]보다 작게 나타난 것을 확인 할 수 있는데, 이는 계절적인 요인이 뇌방전의 특성에 미치는 영향 때문일 것으로 예상된다.[10]

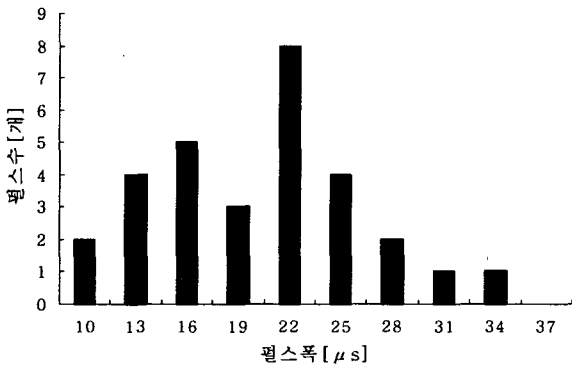


그림 11. 운방전에 의한 자장 파형의 펄스폭 분포  
Fig. 11. Histograms of the full pulse width of the magnetic field waveforms produced by cloud discharges

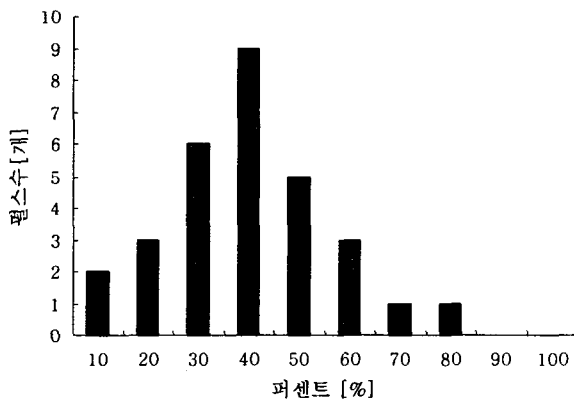


그림 12. 운방전에 의한 자장 파형의 반전딥 깊이의 분포  
Fig. 12. Histograms of the depth of the dip to opposite polarity for magnetic field waveforms produced by cloud discharges

마지막으로 운방전에 의한 자장 파형의 백분율 반전딥 깊이의 분포를 그림 12에 나타내었다. 평균 반전딥 깊이는 41.1 [%]이며, 표준편차는 19.3 [%]로 다소 넓게 분포되어 있다. 이미 발표된 반전딥 깊이는 75~81 [%]인 것을 감안할 때 상대적으로 작은 값을 보인다.[10] 역시 기후적인 요인의 영향을 받은 것으로 판단되어지나 관측 시스템에서 센서의 특성을 정확히 파악하지 못한 오차일 가능성도 배제할 수 없기 때문에 앞으로 보다 정확한 연구가 요구된다.

3.4 운방전에 의한 자장 파형 파라미터의 비교

1997년에 본 연구실에서 운방전에 의한 자장 파형의 특성을 분석한 결과와 아열대 해양성 기후인 플로리다에서 1985년에 Weidman과 Krider가 운방전에 의한 자장 파형의 특성을 분석한 결과를 비교해 보았다. 플로리다에서 관측된 자장 파형의 파라미터의 통계적 특성은 우리나라에서 발생하는 운방전에 의한 자장 파형 파라미터의 특성과는 지형학적 그리고 기상학적 원인으로 다를 수도 있다. Weidman과 Krider가 미국 남부 플로리다의 케네디 우주센터에서 측정된 운방전에 의해서 방사된 전자파 펄스는 모두 완만하게 상승하였으며, 펄스의 초기 반주기의 지속시간에 해당하는 영점교차시간은 약 10 [μs]이었다.[11] 또한 Krider, Radda와 Noggle은 플로리다와 아리조나에서 발생한 운방전에 의해 방사된 전자파 펄스 파형의 특성에 대한 연구결과를 발표하였다.[12] 이들은 전자장 파형의 초기 반주기의 반치폭(full width at half maximum)의 값을 분석하였으며, 해양성 기후인 플로리다에서 측정한 627개 파형의 반치폭의 평균은 6.1±3.1 [μs]이었고, 대륙성 기후인 아리조나에서 측정한 파형의 744개에 대한 반치폭의 평균은 5.1±1.8 [μs]이었다. 펄스폭은 정극성의 경우 41±13 [μs], 부극성은 평균 63±39 [μs]이었다.

Cooray와 Lundquist는 열대지방인 스리랑카에서 발생한 운방전에 의한 전자장 파형의 특성에 대한 연구 결과에서 영점교차시간은 13±4.9 [μs], 펄스폭은 75±25.9 [μs] 그리고 반전딥의 깊이는 30±15 [%]임을 발표하였다.[13] 해양성 기후인 일본의 관서지방에서 Ushio등의 연구자는 동절기 운방전에 의한 전자장 파형의 펄스폭에 대한 결과로 정극성 19±9 [μs], 부극성 16±7 [μs]인 것을 보고하였다.[14] 전체적인 파라미터 비교를 표 1에 나타내었다.

표 1. 다른 관찰지역에서 측정된 파형 파라미터의 비교  
Table 1. Comparison of the waveform parameters measured in different observation stations

	한국	일본	스리랑카 1985
	2004(가을)	1985(겨울)	
상승시간	6.15±1.67 μs	—	4±1.3 μs
영점교차시간	9.61±2.15 μs	—	13±4.9 μs
펄스폭	21.94±5.84 μs	pos.: 19±9	75±25.9 μs
		neg.: 16±7 μs	
반전딥 깊이	0.41±0.19	pos.: 0.71	0.3±0.15
		neg.: 0.59	

이와 같이 운방전에 의해서 발생하는 자장 펄스의 특성과 파라미터는 다른 연구자가 발표한 결과와 비교해보았을 때

상승시간과 영점교차시간은 2~4 [ $\mu$ s]의 차이를 그리고 펄스 폭은 50 [ $\mu$ s] 정도의 차이를 나타내었으며, 이에 대한 개략적인 원인으로서는 관측장소의 지형학적 그리고 기상학적 요인에 기인된 것으로 볼 수 있다.

영점교차시간과 펄스폭의 차이는 계절적인 요인과 지형적인 요인이 자장 파형의 특성에 직접 영향을 준 것으로 판단된다. 운방전에 의한 자장 파형은 뇌방전 위치와 관측 지점 사이의 거리에 의존하므로 분석대상으로 한 파형의 선정에 따른 차이도 있을 것으로 예상된다. 앞으로 운방전에 의해서 발생하는 전자장 파형에 대한 지속적인 데이터의 축적으로 EMC/EMI 및 내뢰설계에 관한 기초 자료의 확보를 위한 연구가 요망된다.

#### 4. 결 론

뇌방전에 의해서 방사되는 자장 파형을 측정할 수 있는 계측시스템을 구성하였으며, 실측 실험을 통하여 자장 파형의 파라미터는 LabVIEW를 이용하여 통계적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① LabVIEW 프로그램을 이용하여 10 [ms] 범위의 데이터 저장 및 고정도 분석시스템을 구현하였다.
- ② 운방전에 의한 자장 파형을 측정하여 운방전의 지속시간은 평균 1.3 [ms]이며, 전자장 펄스의 수는 평균 8이었다.
- ③ 운방전에 의해 발생한 자장 파형의 상승시간은 6.15 [ $\mu$ s]이고, 영점교차시간은 9.61 [ $\mu$ s]이며, 전체 펄스폭은 21.9 [ $\mu$ s] 그리고 백분율 반전딴 깊이는 41.1 %로 나타났다.
- ④ 운방전에 의해서 발생하는 자장 파형은 지형학적 그리고 기상학적 요인에 의해 차이가 발생할 수 있다. 또한 관측점과 뇌방전점까지의 거리에 대한 의존성으로 예상되는 바 이에 대한 편차의 저감을 위한 지속적인 연구가 요망된다.

#### 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원 사업에 의해 작성되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. D. Weidman, E. P. Krider, "The Fine Structure of Lightning Return Stroke Wave Forms", J. Geo. Res. Vol.83, No. C12, pp.6239-6247, 1978.
- [2] M. A. Uman and E. P. Krider, "A Review of Natural Lightning : Experimental Data and Modeling", IEEE Trans., Vol.EMC-24, No.2, pp.79-105, 1982.
- [3] M. Ishii and J. Hojo, "Statistics on Fine Structure of Cloud-to-Ground Lightning Field Waveforms", J. Geo., Res., Vol.94, No.D11, pp.267-274, 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.
- [5] F. Serghei and S. Sangkassad, "National Lightning location network-an alternative approach", IEEE Trans., Vol.2, No.21-25, pp.965-968, 2000.
- [6] E. O'Neill-Carrillo and J. Arroyo, "The Atmospheric Phenomena Laboratory: connecting electrical and computer engineering through undergraduate research". IEEE Tran., Vol.3, No.6-9, pp.s4c-7-s4c-12, 2002.
- [7] 이복희, 길경석, 박동화, "루프형 센서를 이용한 측정계", 센서학회지, Vol.4, No.2, pp.14-21, 1995.
- [8] B. H. Lee, et al., "Characteristics of the Radiation Field Waveforms Produced by Lightning Return Strokes", Jpn. J. Appl. phys., Vol. 43, No. 7A, pp.4379-4385, 2004.
- [9] Bok-Hee Lee, Sun-hun Chang, Chang-Hwan Ahn, Seung-Chil Lee and Duk-Kyu Jeon, "Statistical Analysis of Electric and Magnetic Fields due to Multiple cloud Lightning Discharges", Proceedings of the International Workshop on High Voltage Engineering. Vol.II, pp19-24, 1999.
- [10] B. H. Lee, S. C. Lee, C. H. Ahn and T. Kawamura, "Physical Properties of Radiation Fields Produced by Multiple In-cloud Lightning Discharges", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, No. 1, pp.299-306, 2001.
- [11] C. D. Wiedman and E. P. Krider, "The Radiation Field Wave Forms Produced by Intracloud Lightning Discharge Processes", J. Geo., Res., Vol. 84, No. C6, pp.3159-3164, 1979.
- [12] E. P. Krider, G. J. Radda and R. C. Noggle, "Regular Radiation Field Pulses Produced by Intracloud Lightning Discharges", J. Geo. Res., Vol. 80, No. 27, pp.3801~3804, 1975.
- [13] V. Cooray and S. Lundquist, "Characteristics of the Radiation Fields form Lightning in Sri Lanka in the Tropics", J. Geo. Res., Vol. 90, No. D4, pp.6099-6109, 1985.
- [14] T. Ushio, et al., "Characteristics of Pulse Trains Superimposed on the Electric Field Changes of Japanese Winter Lightning", T. IEE Japan, Vol. 116-B, No. 4, pp.453-459, 1996.

저 자 소 개



이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수. 인하대학교 차세대 고전압전력기술연구센터장.  
Tel. (032) 860-7398, Fax.(032) 863-5822,  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr



길형준 (吉亨準)

1969년 8월 27일생. 1997년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 인하대 대학원 졸업(석사). 현재 한국전기안전공사 부설 전기안전연구원 근무. 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.  
E-mail : g2001100@inhavision.inha.ac.kr



조성철 (趙成哲)

1977년 12월 16일생.  
2003년 인하대학교 전기공학과 졸업.  
2005년 동대학원 전기공학과 석사졸업.  
2005년~현재 기초전력연구원 재직 중.  
Tel : 02-882-3397  
Fax : 02-883-0827  
E-mail : canfeel@snu.ac.kr



심응보 (沈應輔)

1959년 12월 23일생, 1982년 한양대학교 전기공학과 졸업, (현) 한전 전력연구원 변전기술그룹 변전기술그룹 그룹장, 관심분야 : 송변전설비 절연설계, 낙뢰 관측 및 분석  
Tel : (042) 865-5860,  
Fax : (042) 865-5844  
E-mail : ebshim@kepri.re.kr



우정욱 (禹貞旭)

1968년 9월 19일생, 1992년 경북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1994년 한전전력연구원 입사, (현) 한전 전력연구원 변전기술그룹 선임연구원, 관심분야 : 송변전설비 절연설계, 낙뢰 관측 및 분석  
Tel : (042) 865-5864,  
Fax : (042) 865-5844  
E-mail : jwwoo@kepri.re.kr