

## 낙뢰에 의하여 발생하는 자장의 계측과 통계적 분석

이 복희 · 박 성열<sup>o</sup>

인하대학교 전기공학과

### Measurement and Statistical Analysis of Magnetic Fields Produced by Lightning Return Strokes

Bok - Hee Lee · Sung - Yeol Park<sup>o</sup>

Dept. of Electrical Engineering, College of Engineering, Inha University

#### Abstracts

In this paper, magnetic fields produced by lightning return strokes were investigated and analyzed. Magnetic field and its derivatives were measured with two crossed loop antennas. Frequency bandwidths of the magnetic field and its derivative measuring systems are in the range of 270 [Hz] ~ 2.3 [MHz] and 450 [Hz] ~ 2.5 [MHz], and their response sensitivity are 128 [mV/ $\mu$ T] and 4.12 [mV/nT/ $\mu$ s], respectively. Signals are digitized every 500 [ns], data are automatically recorded by transient signal analyzer(Nicolet Pro. 30) having the resolution of 12-bit and the length of 5 kilowords, and they are registered at personal computer. Magnetic field and its derivative waveforms associated with lightning return strokes were observed since the summer of 1997 at Inha University in Incheon.

#### 1. 서 론

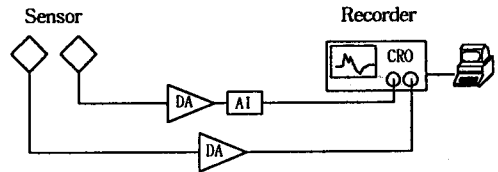
에너지수송의 근간인 송전선의 내뢰성능의 향상에 대하여 많은 연구가 추진되어 왔고, 송전선 사고의 주요한 원인은 낙뢰가 지배적임이 이미 밝혀졌으며, 전력계통의 내뢰특성에 대한 중요성은 더욱 부각되고 있다. 송전선로와 배전선로를 포함한 전력계통의 설계시 뇌사고율을 고려하는 것은 이미 일반화되었고, 그의 기초가 되는 것으로서는 사고의 발생원인, 낙뢰의 각종 파라미터 및 이들에 대응하는 송전선의 전기적 특성을 파악하는 것이다. 고정밀 계측기기의 측정기술이나 계산방법의 진보에 따라 송전선의 전기적 특성의 해석에 대한 연구성과는 많이 보고되었으며, 선전 외국에서는 낙뢰 파라미터에 관해서 연구되고 있지만, 우리 나라에서는 거의 연구되지 않는 실정인으로서 이 분야에 대한 활발한 연구가 요망된다.

따라서 본 연구에서는 낙뢰에 수반되어 발생하는 자장파형을 관측·자동기록하는 계측시스템을 구성하여, 낙뢰에 의하여 발생하는 자장파형과 그의 미분파형을 관측하고, 이들에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 즉, 낙뢰에 의하여 발생하는 자장파형과 미분파형을 관측하여 낙뢰시의 자장파형의 파도 시간, 감쇠시간분포, 반전피크치 및 미분파형의 펄스폭과 영점교차시간에 대한 통계적인 특성을 분석하였다.

#### 2. 측정시스템 및 특성

##### 2.1 측정시스템

낙뢰에 의하여 발생하는 자장성분을 검출하기 위하여 루프형 센서를 이용하였으며, 미분신호 측정기에서는 동상모드잡음을 제거하기 위하여 차동증폭기를 적용하였고, 또한 실신호 측정기에서는 원래의 신호로 복원시키기 위해 차동증폭기와 능동형 적분기를 구성하여 적용하였다. 측정계의 전체시스템을 그림 1에 나타내었다.



DA : Differential amplifier    AI : Active integrator

그림 1 자장측정계의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic field & its derivative measuring system

자장센서로는 한 변의 길이가 0.5 [m]인 사각루프를 직각으로 제작하였으며, 낙뢰시에는 자장뿐만 아니라 전장도 동시에 발생하기 때문에 전장에 의한 영향을 줄이기 위해 등속케이블을 사용하였다. 또한 접속부는 모두 BNC커넥터를 사용하여 임피던스정합이 잘 이루어지도록 하였으며, 신호처리회로부를 금속제 외함에 내장시켜 피측정 전자계에 기인되는 전자유도장에 즉, 전자잡음이 극소화되도록 제작하였다.

데이터취득시스템으로는 자장신호에 의하여 트리거되며, 분해능이 12 bit이고, 샘플링시간을 100 [ns]에서 500[ $\mu$ s]의 범위로 조절할 수 있는 과도신호해석기(Nicolet Pro.30)를 사용하였다. 계측된 자장신호는 GPIB를 통해서 자동적으로 개인용 컴퓨터에 전송되어 저장되며, 신호해석도 가능하다.

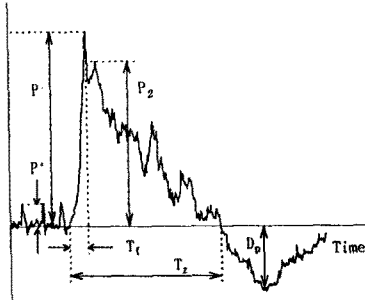
##### 2.2 측정시스템의 특성

IEEE - 664 규정의 교정회로에 정현파 전류를 입력시켜 자장측정계의 주파수대역과 응답감도의 산출을 위한 교정실험

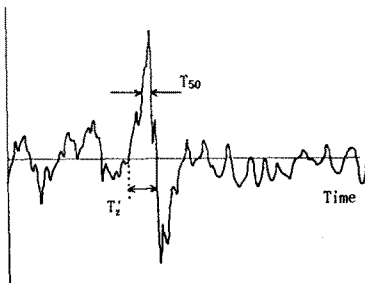
을 수행하였다. 그 결과 자장측정계의 주파수대역은 270 [Hz] ~ 2.3 [MHz]이고, 자장의 미분신호측정계의 주파수 대역은 450 [Hz] ~ 2.5 [MHz]로서, 본 자장측정계는 낙뢰에 의해서 방사되는 자장파형을 아무런 감쇠없이 측정할 수 있었다. 또한 자장측정계의 응답감도는 128 [mV/nT/μs]이고, 미분신호 자장측정계의 응답감도는 4.12 [mV/nT/μs]이다.

### 3. 결과 및 고찰

낙뢰시에 발생된 자장파형과 그의 미분신호의 예와 파라미터를 그림 2에 나타내었다. 낙뢰에 의해서 방사되는 자장파형의 파두부분의 특징은 초기에 서서히 상승하는 부분과 그 후의 급상승하는 부분으로 분류된다. 서서히 상승하는 부분은 최후 리더의 진전에 의한 것이며, 급상승하는 부분은 귀환회격에 의해서 발생된다. 낙뢰에 의해서 발생한 전자파가 전기 전도도가 유한인 대기 또는 해상을 전파하게 되어 길어지게 되며, 최종 리더가 증폭되는 경우도 있다. 또한 자장파형에서 2번째 피크가 1번째 피크보다도 큰 경우도 있는데, 이러한 현상은 전파경로의 도전을 기인된 것으로 전파경로의 도전을 이 양호한 위치에서 도전이 낮은 경로를 거쳐 센서에 도달되었기 때문인 것으로 볼 수 있다. 파미부분의 특성은 낙뢰지점과 관측점 사이의 거리에 따라 변화되며, 대체로 50 [km]이내의 근거리일 때는 방사성분과 유도성분이 혼재하는 파형으로 나타났으며, 50 [km]이상의 먼 거리에서는 주로 방사성분만이 나타난다.<sup>[1],[2]</sup> 그리고 미분신호의 첫 번째 파형의 펄스폭은 그에 상응하는 실신호의 파두부분의 특징을 나타낸다.<sup>[3]</sup>



(a) 실신호



(b) 미분신호

그림 2 낙뢰에 의해 발생된 자장파형의 파라미터  
Fig. 2 Parameters of magnetic field & its derivative waveforms produced by lightning return strokes

자장파형은 파두시간, 영점교차시간과 반대방향으로의 오비 슈트 등의 여러 가지 파라미터에 의하여 특징지워지는데, 이들 파라미터는 전송로의 도전을 및 낙뢰지점과 감지용 센서까지의 거리 등에 따라 변화된다.

실신호의 경우는 전구방전의 리더 펄스, 파두시간, 두 번째 피크, 영점교차까지의 시간, 영점교차 후 반대방향으로의 피크와의 비율 등의 파라미터로 특징을 나타낼 수 있으며, 미분신호의 경우는 전구방전의 리더 펄스, 펄스폭, 영점교차시간 등으로 특징을 나타낼 수 있다.

자장파형의 파두특성으로는 파형의 시작점에서부터 최대치까지 걸리는 시간으로 나타내어 0~100% 파두시간( $T_r$ )으로 하였다. 파두시간의 원점을 결정하기에는 다소 애매한 점이 있지만 파두시간은 파두의 성질을 나타내는데 있어서 매우 유용하다. 영점교차시간(zero-to-zero crossing time;  $T_z$ )은 제1진동 규약원점의 시작에서부터 극성이 바뀌는 시점까지 걸리는 시간을 나타내는 파라미터이고, 백분율 반전딥깊이(percent of dip-depth;  $D_p$ )는 파형의 첫 번째 피크값에 대한 반대 극성의 피크값의 백분율을 나타낸다.<sup>[4]</sup> 또한 미분신호의 경우는 실신호의 급상승 부분의 특징이 잘 나타나는 펄스폭(full width at half-maximum;  $T_{50}$ )과 실신호의 파두시간에 해당되는 영점교차시간에 대해서 분석하였다.

1997년에 6월 이후 인천부근에서 발생한 낙뢰에 의해 방사된 자장파형에 대해서 통계적으로 분석하였다.

낙뢰에 의해서 발생하는 자장파형의 파두시간 분포를 그림 3에 나타내었으며, 평균파두시간이 3.09 [ $\mu$ s]이고, 표준편차는 1.20 [ $\mu$ s]이었으며, 주로 1~4 [ $\mu$ s]에 밀집되었다. 실신호의 빠르게 상승하는 부분의 특징을 나타내는 미분신호의 펄스폭은

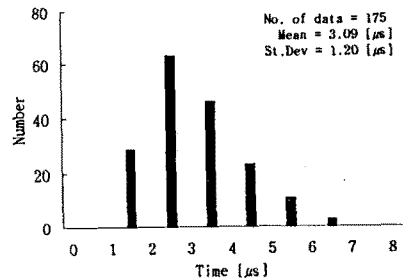


그림 3 실신호의 파두시간  
Fig. 3 The front time of real waveforms

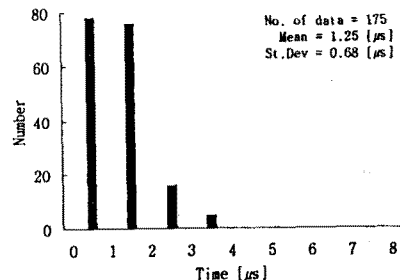


그림 4 미분신호의 펄스폭  
Fig. 4 The full width at half-maximum of derivative waveforms

그림 4에 나타낸 바와 같이 평균시간이 1.25 [ $\mu$ s]이고, 표준편차는 0.68 [ $\mu$ s]로서 주로 2 [ $\mu$ s]이하로 관측되었다.

실신호의 파두시간에 대응하는 미분신호의 영점교차시간은 평균시간이 3.27 [ $\mu$ s]이고, 표준편차가 1.19 [ $\mu$ s]로서 실신호의 파두시간보다 다소 긴 시간으로 분석되었다. 이는 파두시간의 원점을 결정하기가 매우 까다로운 관계로 규약원점을 구하여 시작점으로 정의하기 때문이다. 그러나 전체적인 분포 형태는 실신호의 파두시간과 비슷한 양상을 보이고 있다.

영점교차시간은 파형의 시작점에서 극성이 바뀌는 시점까지 걸리는 시간으로 정의하였으며, 이는 파미의 특성을 나타낸다. 낙뢰가 지속되는 정도를 평가하는 파라미터로 뇌격에

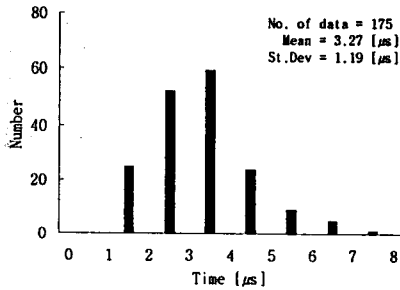


그림 5 미분신호의 영점교차시간  
Fig. 5 The zero - to - zero crossing time of derivative waveforms

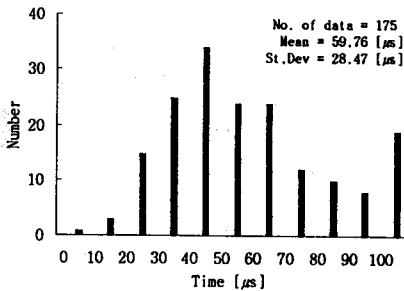


그림 6 자장파형의 영점교차시간  
Fig. 6 The zero - to - zero crossing time of magnetic field waveforms

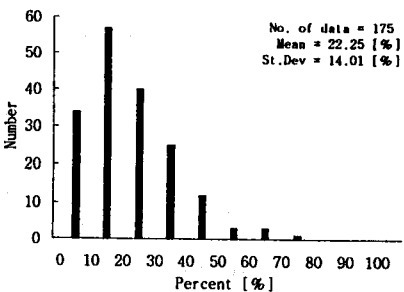


그림 7 자장파형의 백분율 반전깊이  
Fig. 7 The percent of dip - depth of magnetic field waveforms

의해서 대지로 전달되는 에너지의 양을 평가할 때 적용되며, 낙뢰지점과 관측점 사이의 거리의존성을 가지게 된다.<sup>[6]</sup> 그림 6에서 평균영점교차시간은 59.76 [ $\mu$ s], 표준편차는 28.47 [ $\mu$ s]이었으며, 100 [ $\mu$ s] 이상의 것도 다수 관측되었다.

자장파형의 백분율 반전깊이는 낙뢰지점과 관측점 사이의 거리에 따라 변화하게 되며, 원거리 낙뢰의 경우는 크고 근접 낙뢰의 경우는 작게 나타나게 된다. 낙뢰에 의해서 발생한 전자파의 전리층에 대한 반사작용의 영향을 포함하기도 하지만 본 연구에서는 전리층의 영향이라고 판단되는 데이터는 모두 제외시켰다. 그림 7에 낙뢰에 의해서 발생한 자장파형의 백분율 반전깊이에 대한 데이터를 나타내었다. 평균값이 22.25 [%], 표준편차는 14.01 [%]이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 낙뢰에 의해서 방사되는 자장파형의 실신호와 미분신호를 측정할 수 있는 계측시스템을 구성하였으며, 이들을 이용하여 낙뢰에 의해서 방사되는 자장파형을 관측하였고, 이들의 특성을 통계적으로 분석하였다.

낙뢰에 의해 발생하는 자장파형은 낙뢰지점과 관측점 사이의 거리에 의존하며, 뇌격지점과 관측점 사이의 거리가 약 50 [km]이상 떨어진 원거리에서 발생된 자장파형을 통계적으로 분석한 결과 파두시간의 평균치는 3.09 [ $\mu$ s]로서 미분신호의 펄스폭의 평균치 3.27 [ $\mu$ s]보다는 다소 짧게 분석되었고, 실신호의 급상승하는 부분의 특징을 나타내는 미분신호의 펄스폭의 평균치는 1.25 [ $\mu$ s]이었다. 또한 자장의 실신호의 파미부분의 특징을 나타내는 영점교차시간은 59.76 [ $\mu$ s], 백분율 반전깊이는 22.25 [%]로 분석되었다.

낙뢰에 의해 발생하는 자장파형의 특성을 보다 철저히 규명하기 위해서는 이와 같은 방법으로 더욱 연구할 필요가 있으며, 또한 이들 결과는 뇌보호장치의 설계와 개발에 유용한 기초자료로 활용될 것이다.

#### 참고문헌

- [1] 이복희, 이경옥, 하봉철, "뇌방전에 의해서 발생하는 자계의 특성", 대한전기학회 논문지, Vol.45, No.9, pp.1318~1324, 1996.
- [2] P.W. Casper, "The LPATS Time of Arrival Lightning Positioning System : Critical Performance Aspects", 20th ICLP, pp.1~12, 1990.
- [3] F. Heidler, C. Hopf, "A Review about the LEMP Characteristics of Near Return Strokes Measured in the South of Germany during the Last 15 Years", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.6742 - 1~4, 1995.
- [4] 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.
- [5] B.H. Lee, C.H. Ahn, K.O. Lee and S.Y. Park, "Parameters of the Electric and Magnetic Field Waveforms Associated with Lightning Return Strokes", Proceedings of 1997 Japan - Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp.225~228, 1997. 10.