

낙뢰에 있어서 계단상 리더의 특성

이복희, 정광희, 이동문, 성준환, 안창환
인하대학교, 한국전력공사

Characteristics of the stepped leaders in cloud-to-ground lightning discharges

B.H. Lee, K.H. Jeang, T.M. Lee, J.W. Sung, and C.H. Ahn
Inha University, Korea Electric Power Co.

Abstract - In this paper, the electric and magnetic field waveforms produced by cloud-to-ground lightning discharges were measured and statistically analyzed. The measuring system used to measure the electric and magnetic fields is consisted of the hemisphere electric field sensor, the loop magnetic field sensor and the data acquisition system. The stepped leader is appeared before the return stroke. Some parameters of the electric and magnetic fields produced by the stepped leaders in cloud-to-ground lightning discharges were investigated.

리더는 평균 50 m의 스텝길이를 가지고 진전하며, 50[μs]의 시간간격분포를 갖는 것으로, 또한 1.5×10^6 [m/s]의 진전속도를 갖으며, 계단상 리더에 의해 전달되는 전하량은 5[C]으로 보고되었다.⁽²⁾

1. 서론

현대 사회는 생활 수준의 향상과 더불어 정보화 기기의 사용이 급증하고 있으며, 이에 따라 양질의 전기 에너지에 대한 요구가 급증하고 있다. 그러나 뇌격 등의 자연재해에 따른 전력계통사고가 급증하고 있으므로 전력설비의 내뢰대책 수립을 위한 설계기준에 대한 연구와 자료 등의 필요성이 요구되고 있다.⁽¹⁾ 따라서 내뢰대책의 수립에 필요한 유용한 정보를 포함하고 있는 뇌방전시의 전장과 자장 파형의 측정 및 통계적 분석을 통하여 전력계통의 절연설계는 물론 피뢰기, 가공지선, 피뢰침, 서지보호장치 등의 적정설계가 필요하다. 또한 현재 우리나라의 설계기준도 외국의 연구결과를 적용하고 있으므로 우리나라의 환경에 적합한 설계기준을 수립할 필요가 있다. 특히 피뢰보호범위의 결정에 있어서 외국의 규정인 NFPA규정을 그대로 적용하고 있으므로, 우리나라의 실정에 맞는 피뢰보호범위를 결정하기 위하여서는 이의 기초 자료가 되는 뇌방전의 계단상 리더의 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 반구형 전장센서와 루프형 자장센서를 설계·제작하여 과도전자장 측정시스템을 구현하였으며, 1999년도의 전장 및 자장 파형을 측정하였다. 그리고 계단상 리더에 의해 발생한 전장과 자장의 특성을 나타내는 파라미터에 대하여 통계적인 분석을 수행하였다.

2. 본론

2.1 뇌방전 현상

뇌방전은 한번의 섬락과정이 아닌 연속적인 펄스의 조합으로 나타나는데, 낙뢰의 진전메카니즘은 초기 방전에 의한 대기중의 예비절연파괴, 스텝리더, 부락과정, 제1귀환뇌격, 다트리더, 후속 귀환뇌격으로 이루어진다.⁽²⁾ 주방전인 귀환뇌격이 일어나기 전에 계단상의 리더 진전이 이루어지는데, 이 과정을 그림 1에 나타내었다. 뇌운 주위의 절연파괴에 의해서 뇌운내의 부전하가 대지로 하향 진전하게 되고, 이에 따라 대지의 정전하가 상향 스트리머를 일으켜 하나의 도전체널이 형성되는데, 이 때 뇌운으로부터 하향 진전하는 과정에서 계단상 진전이 이루어지게 된다. 계단상

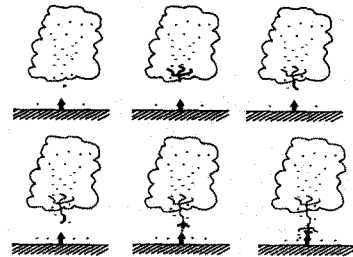


그림 1. 계단상 리더의 발달과 진전
Fig. 1 Initiation and propagation of the stepped leader

2.2 실험

2.2.1 측정시스템의 구성

뇌방전은 대단히 불규칙적으로 일어나는 대기 방전으로서, 수반되어 나타나는 전자장의 파형을 측정하기 위해서는 기록대기상태에 있다가 자동측정 및 기록하는 측정시스템이 요구된다. 따라서 주위 환경의 영향이 가장 적은 반구형 전장 센서와 3차원 루프형 자장 센서를 과도신호검출기와 서로 인터페이스하여 전자장 측정시스템을 구현하였으며, 이의 개략도를 그림 2에 나타내었다.

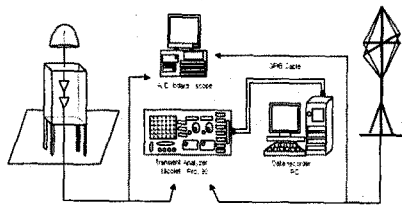


그림 2. 전장과 자장 측정시스템의 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of the electric and magnetic fields measurement system

2.2.2 측정시스템의 특성

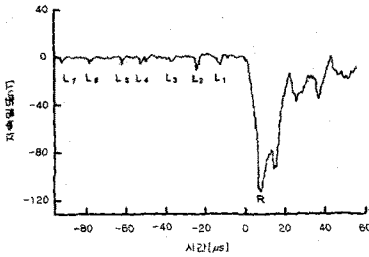
전자장 측정시스템의 기본 특성을 파악하기 위해서 단위 계단 입력에 대한 응답특성의 실험을 수행하였으며, 그 결과 전장 측정시스템의 주파수 대역은 200Hz~1.56MHz이었으며, 응답감도는 1.05V/m/mV로 산출되었다. 또한 자장 측정시스템의 주파수 대역은 270Hz~2.3MHz이었으며, 응답감도는 7.81nT/mV로 산출되었다. 따라서 본 전자장 측정시스템을 통하여 뇌방전의 전자장

파형을 예측할 수 있으며, 미약한 전기방전신호까지도 검출이 가능하였다.

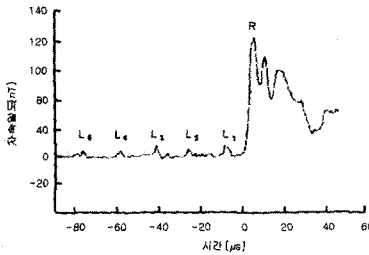
3. 결과 및 고찰

3.1 뇌방전에 의한 전장과 자장 파형의 특성

낙뢰의 진전은 크게 귀환뇌격과 귀환뇌격 이전의 계단상 리더로 구분할 수 있으며, 이중 계단상 리더의 특성은 피뢰침의 보호범위 결정에 중요한 파라미터가 된다. 그림 3에는 귀환뇌격에 있어서 계단상 리더의 대표적인 예를 나타내었다. 귀환뇌격 R 이전의 L_n 로 표기된 것이 계단상 리더인데, 일반적으로 리더간의 시간간격은 귀환뇌격으로 진행될수록 짧게 나타났으며, 리더의 크기는 크게 나타났다. 그리고 귀환뇌격으로 진전됨에 따라 펄스폭이 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 계단상 리더의 특성은 뇌방전의 계단상 진전에 의해 전달되는 전하량과의 관계로 이해할 수 있다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 3. 낙뢰에 의해 발생한 자장 파형의 예
Fig. 3 Typical magnetic field waveforms produced by cloud-to-ground lightning strokes

3.2 계단상 리더의 파라미터

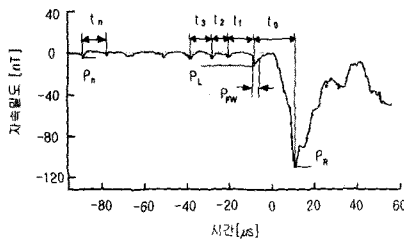


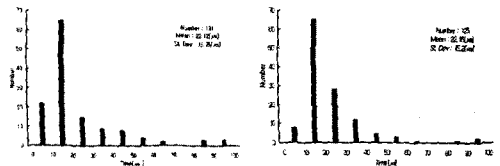
그림 4. 낙뢰에 있어서 계단상 리더의 전자기장 파형의 파라미터

Fig. 4 Parameters of the electric and magnetic field waveforms produced by the stepped leaders in cloud-to-ground lightning strokes

귀환뇌격에 있어서 발생하는 계단상 리더의 특성 분석을 통계적으로 수행하기 위하여 리더 펄스의 특성을 대표하는 파라미터들을 선정하여 측정 파형에 적용하였다. 귀환뇌격에서 L_1, L_2, \dots, L_n 과 같이 역순으로 나타내었으며, 최종 리더 펄스 P_L 과 주뇌격 P_R 과의 시간간격을 t_0 으로 나타내었으며, 리더 펄스 사이의 시간간격 분포를 리더 펄스의 피크에서 이전 리더 펄스의 피크까지의 시간간격을 t_1, t_2, \dots, t_n 으로 정의하였으며, 최종 리더 펄스와 귀환뇌격과의 피크비 분포를 P_L/P_R 으로 정의하였다. 또한 리더 펄스의 형태가 일정한 패턴을 갖지 않아 파두·파미의 특성이 나타나지 않으므로 리더 펄스의 50%펄스폭 분포의 통계적인 분석을 수행하였다. 그리고 계단상 리더의 진전 프로세스에 대한 추정을 위하여 리더 펄스와 피크대 시간비를 P_n/t_n 으로 정의하였으며, 선정된 파라미터들을 측정된 전자기장 파형에 대하여 통계적인 분석을 수행하였다.

3.3 계단상 리더의 통계적 특성

뇌방전에 의해 발생하는 계단상 리더의 최종 리더 펄스와 귀환뇌격 사이의 시간간격 분포를 그림 5에 나타내었다. 리더 펄스의 시간 간격은 전장과 자장이 모두 같게 나타나므로 전자기장으로 나타내었으며, 이는 극성 의존성이 나타나지 않았다. 정극성의 경우 평균이 22.12[μ s]이었으며, 부극성의 경우 평균이 22.16[μ s]이어서 서로 비슷한 값을 나타내었다. Florida와 Arizona에서 Krider와 Radda가 측정한 결과의 경우 14.9[μ s]이었는데, 본 연구결과와의 차이는 지형적·기후적 영향에 따른 것으로 추정된다. 그러나 해외의 자료와 본 연구의 결과 모두 10~20[μ s]에서 집중적인 분포를 보였다.⁽³⁾ 전자기장 파형의 리더 펄스 사이의 시간간격 분포를 그림 6에 나타내었다. 정극성의 경우 평균값이 21.05[μ s]이었으며, 최소값이 4.8[μ s], 최대값이 119.5[μ s]으로 나타났다. 부극성의 경우는 평균값이 20.42[μ s]으로 나타났으며, 최소값이 5[μ s], 최대값이 149.2[μ s]으로 나타났다. 또한 정·부극성 전체의 평균은 19.54[μ s]이어서, Florida와 Arizona에서의 연구 결과인 13.7[μ s] 보다는 큰 값을 나타내었다.⁽³⁾

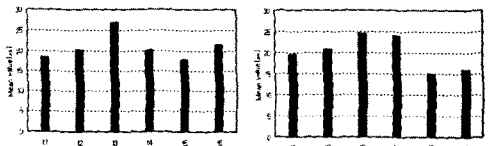


(a) 정극성

(b) 부극성

그림 5 최종 리더 펄스와 귀환뇌격 사이의 시간간격의 분포

Fig. 5 Distributions of the time interval between final leader and the return stroke.



(a) 정극성

(b) 부극성

그림 6 리더 펄스의 평균시간간격의 분포

Fig. 6 Distributions of the average time interval between leaders

전자장 파형과 자장 파형의 최종 리더와 귀환뇌격의 파

크비 분포를 그림 7에 나타내었다. 전장의 경우 정극성에 대해서 평균이 21.55(%), 부극성에 대해서 24.53(%이었으며, 자장의 경우 정극성에 대해서 16.22(%), 부극성에 대해서 15.54(%으로 나타났다. Sweden에서 관측된 결과는 평균이 10(%으로서 본 연구의 결과가 더욱 크게 나타났다. 즉, 우리나라의 경우 리더의 크기가 크게 나타났음을 보여준다. 리더 펄스의 피크와 시간비의 분포를 그림 8에 나타내었다. 전장의 경우 부극성이 더 크게 나타났으며, 귀환뇌격으로 진전됨에 따라 리더 피크와 시간간격의 비는 크게 나타났다. 이는 귀환뇌격으로 진전됨에 따라 리더 펄스가 커지는 경우와 리더 사이의 시간간격이 작게 나타나는 두 가지의 경우를 고려할 수 있다. 자장의 경우도 전장과 같은 특성을 나타내었으나 자장에서는 부극성보다 정극성의 경우가 더 큰 특성을 나타내었다.

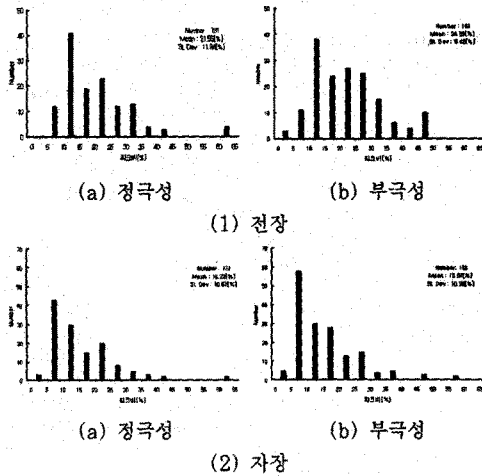


그림 7 최종 리더와 귀환뇌격의 피크비
Fig. 7 Histograms of the ratio of the final leader peak to the return stroke peak

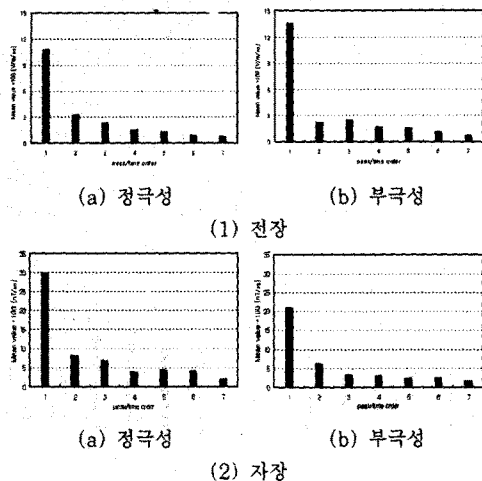


그림 8 계단상 리더의 의한 전장과 자장 파형의 피크와 시간비의 분포
Fig. 8 Histograms of the ratio of the leader peak to the time interval for the electric and magnetic fields due to the stepped leaders

계단상 리더는 파두·파미의 특성이 분명치 않으므로 펄스의 50(% 펄스폭을 취하여 펄스 특성을 나타내었으며, 리더 펄스의 50(% 펄스폭의 평균값을 취하여 나타낸 분포를 그림 9에 나타내었다. 전장의 경우 정극성의 평균은 1.5(μ s)으로 나타났으며, 부극성의 평균은 2.23(μ s)으로 나타났다. 여기서 부극성의 값은 Florida에서 Krider와 Radda가 수행한 연구 결과와 유사한 값을 나타내었으나, 정극성의 경우는 본 연구의 결과가 더 작게 나타났다.⁽³⁾ 또한 대체적으로 전장의 경우보다 자장의 경우가 더 크게 나타났다. 극성간의 특성은 전장과 자장 모두 부극성이 정극성보다 큰 값을 나타내었다. 전장과 자장 모두 귀환뇌격으로 진전됨에 따라 펄스폭이 증가하였다.

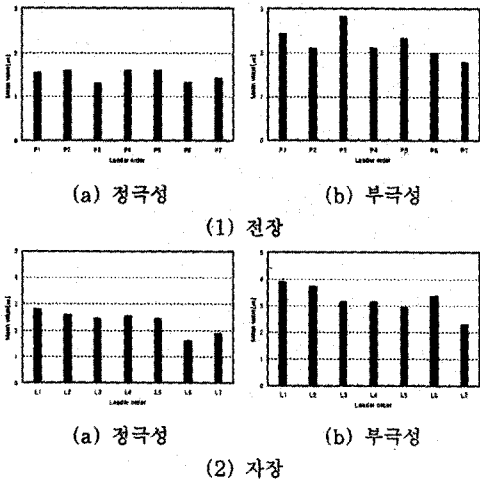


그림 9. 계단상 리더에 의한 전장과 자장 파형의 50% 펄스폭의 분포
Fig. 9 Histograms of the full width at half maximum of the electric and magnetic field waveforms produced by the stepped leaders

4. 결 론

낙뢰의 발달과정의 초기단계에 계단상 리더의 진전이 발생하는데, 최종 리더와 귀환뇌격 사이의 시간차, 그리고 리더 펄스 사이의 시간간격의 경우 극성 의존성이 나타나지 않았다. 또한 최종 리더와 귀환뇌격의 피크비는 전장보다 자장의 경우가 더 작게 나타났으며, 전장의 경우에는 부극성이, 자장의 경우에는 정극성이 더 크게 나타났다. 전장과 자장 모두 귀환뇌격으로 진전됨에 따라 리더 피크와 시간간격의 비는 크게 나타났으며, 펄스폭 또한 증가하였다. 리더의 50%펄스폭은 전장과 자장 모두 극성 의존성이 나타났으며, 부극성의 경우에 있어서 펄스폭이 더 크게 나타났다. 리더 특성 중 최종 리더와 시간간격, 귀환뇌격과의 피크비 등의 자료들은 우리나라에 적합한 피뢰침의 보호범위 결정에 중요한 요소가 되므로, 이에 기초 자료로 활용이 가능하다.

[참고 문헌]

[1] W.C. Hart and E.W. Malone. Lightning and lightning protection, Interference control technologies, Inc. pp.1.6~1.9. 1988.
[2] M.A. Uman. Lightning, Dover Publications Inc., New York, pp.1~12. 1982.
[3] E. Philip Krider and George J. Radda, Radiation field wave forms produced by lightning stepped leader, J.Geo.Res., pp.2653~2657, 1975.