

# 계단상 리더에 의해서 방사된 귀환뇌격 직전의 전장과 자장 파형의 특성

論 文

52C-1-6

## Characteristics of the Electromagnetic Fields Radiated from Stepped Leaders Just Prior to Lightning Return Strokes

李福熙\* · 李東汶\*\* · 鄭東喆\*\* · 張根喆\*\*\* · 李承七§ · 鄭廣熙§§

(Bok-Hee Lee · Dong-Moon Lee · Dong-Cheol Jeong · Keun-Chul Chang · Seung-Chil Lee · Kwang-Hee Jeong)

**Abstract** - In this paper statistics on the radiation field waveforms produced by stepped leaders just prior to lightning return strokes were described. As a parameter of stepped leader pulse characteristics, the time interval between the final leader pulse and return stroke peak, the pause time between stepped leaders, the ratio of the final leader peak to the return stroke peak and the stepped leader pulse width at half maximum were examined. The average time intervals between the final leader pulse and return stroke peak were about 16.2 and 14.8 $\mu$ s for the positive and negative polarities, respectively. When the stepped leader approaches closely to ground, the time interval between leader steps was decreased and the mean value was about 17 $\mu$ s, and the present results were in reasonable agreement with the data observed in Florida and Japan. The large fraction of the ratios of the final stepped leader pulse to the lightning return stroke peak were distributed over the range from 5 to 35% and in average the ratio of the final leader pulse to the return stroke peak was 17.4 $\pm$ 11.9% for the positive and 18.5 $\pm$ 9.4% for the negative electric field waveforms. In addition, the mean pulse widths at half maximum of the stepped leaders are 1.4 $\mu$ s with a standard deviation of 0.9 for the positive polarity and 2.2 $\mu$ s with a standard deviation of 1.2 for the negative polarity, respectively.

**Key Words** : Radiation field waveforms, stepped leaders, mean pulse widths at half maximum, lightning return stroke, electromagnetic pulse

### 1. 서 론

고도의 정보화 사회로의 발달이 이루어지면서 정보·통신·제어·자동화기기 등 여러 가지 전기·전자 기기의 보급이 확산되고 있다. 전력설비의 제어기기를 비롯하여 정보통신기기의 소형화와 고정밀화, 집적화, 고속화가 이루어지면서 반도체 소자의 내전압 특성이 낮아졌으며, 낙뢰에 기인하는 전기설비의 손상 또는 오동작 등으로 인해 전력공급의 신뢰도를 저하시키는 사고가 일어나고 있다. 따라서 뇌보호설비의 설계와 뇌보호장치의 정확한 성능평가를 위해서는 뇌방전에 의해서 발생하는 전자장 파형의 특성을 정확하게 분석하는 것이 중요하다. 귀환뇌격에 의해서 발생하는 전자장 파형에는 귀환뇌격의 발단과 진전과정을 비롯하여 뇌격의 극성, 거리, 방위, 강도 등 여러 가지 물리적 특성에 관한 정보를 포함하고 있다. 뇌방전 특성의 해석에 있어서는 뇌방전의 진전에 관련된 전기적 현상으로 전장과 자장의 파형을 측정하

고 평가하는 것은 매우 타당하며 우수한 방법이다. 특히 귀환뇌격의 특성은 매우 불규칙하므로 통계적인 수법으로 해석하는 것이 바람직하다.[1-5] 본 논문에서는 귀환뇌격 직전의 계단상 리더와 귀환뇌격 피크사이의 상관특성을 해석할 목적으로 귀환뇌격 직전에 발생한 계단상 리더에 의한 전자장 파형을 측정하고, 측정결과와 분석을 바탕으로 한 계단상 리더의 진전과정, 물리적 특성과 파라미터에 대한 통계적 연구결과를 기술하였다. 즉, 귀환뇌격 직전에 발생한 계단상 리더에 의해서 방사된 전자장 파형의 특성을 나타내는 파라미터인 최종 리더 펄스와 귀환뇌격과의 시간간격, 리더펄스 사이의 시간간격, 최종 리더펄스와 귀환뇌격의 피크비, 계단상 리더의 50%펄스폭 등에 대하여 분석하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 귀환뇌격에 의해서 발생한 순시적인 전장과 자장의 변화를 반구형 전장센서와 루프형 자장센서로 검출하고 피측정 신호인 자장의 변화에 의해 과도신호검출기가 트리거되는 계측시스템을 사용하였다. E-dot센서에 의해 검출된 신호를 전장 파형으로 출력하기 위하여 수동성 적분기 및 증폭회로, 임피던스 정합용 전압버퍼회로를 구성하였다. 연산증폭기로는 입력임피던스가 약 10<sup>12</sup>  $\Omega$ 이며, 주파수대역이 DC-70MHz인 LH0032를 사용하였으며, 증폭회로 후단에는 주파수대역이 DC-100MHz인

\* 正 會 員 : 仁荷大學 工大 電子電氣工學部 教授

\*\* 正 會 員 : 仁何大學 大學院 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正 會 員 : 仁何大學 大學院 電氣工學科 碩士課程

§ 正 會 員 : (株)韓進重工業 常務(工學博士)

§§ 正 會 員 : 三星電子(株) 硏究員

接受日字 : 2002年 9月 5日

最終完了 : 2002年 10月 14日

LH0033을 voltage follower로 적용하였으며, 전장측정시스템의 주파수 대역은 200Hz~1.56MHz이고, 응답감도는 1.05V/m/mV이다. 귀환뇌격에 의해서 발생하는 전장의 영향 없이 자장을 측정할 수 있도록 특성임피던스가 50Ω인 동축케이블을 사용하여 한 번의 길이가 50cm인 마름모꼴로 B-dot센서를 제작하였으며, 전장에 의하여 차폐선에 유기된 기전력을 서로 상쇄시키기 위하여 센서 중앙 부분의 차폐선을 절단하였다. B-dot센서의 출력단자는 센서가 감지한 신호를 왜곡 없이 차동증폭기로 입력시키기 위하여 BNC커넥터로 하였으며, 자장측정시스템의 주파수대역은 270Hz~2.3MHz이고, 응답감도는 7.8lnT/mV이다.[6,7]

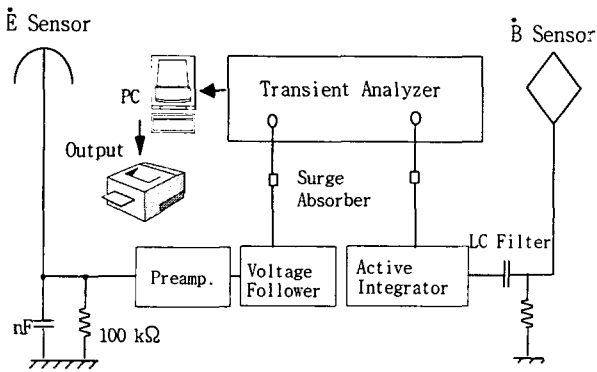


그림 1 전장과 자장측정시스템의 개략도  
Fig. 1 Schematic diagram of the electric and magnetic fields measurement system

데이터취득시스템으로 사용한 과도신호해석기의 분해능은 12비트이며, 신호의 크기도 조절이 가능하고, 검출신호를 100 ns~500μs의 범위로 샘플링시간을 조절할 수 있다. 과도신호 해석기에 입력된 신호는 개인용 컴퓨터에 전송되어 저장되며, 신호의 해석도 가능하다.

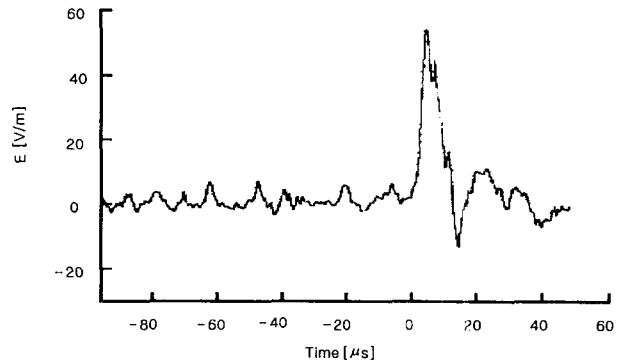
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 계단상 리더에 의해서 발생한 전자장 파형의 특성

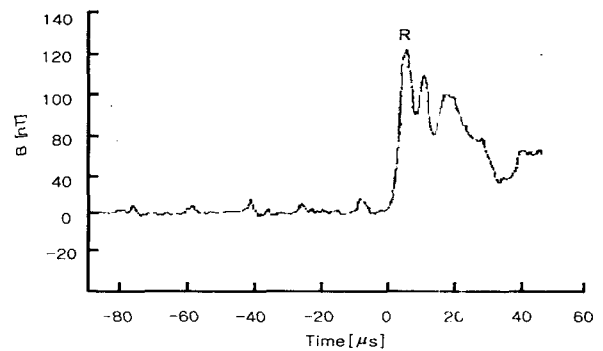
귀환뇌격 직전의 계단상 리더에 의해서 발생한 전장과 자장 파형의 대표적인 예를 그림 2에 나타내었으며, 리더가 뇌운으로부터 대지를 향하여 계단상으로 진전하며 최종적으로 귀환뇌격에 이르는 것으로 볼 수 있다.[1] 귀환뇌격 직전에 관측된 전장과 자장 파형은 대체적으로 거의 동일한 양상을 나타내었으며, 주로 방사 성분임을 알 수 있으며, 이미 보고된 다른 연구자의 측정결과와 매우 유사한 전자장 파형을 얻었다.[1,2]

계단상 리더의 진전길이가 대지로 향하는 진전속도, 예비절연파괴가 일어나는 초기방전형태에 따라 α리더와 β리더로 구분한다. α리더는 β리더보다 스텝당의 진전길이가 더 짧으며 진전속도도 느리고, 빛을 발산하는 정도가 약하다. 또한 β리더는 α리더에 비해 가지(branch)를 많이 형성한다. 계단상 리더에 의해서 나타나는 전장의 변화는 비교적 완만하며, 계단상 리더의 평균진전길이는 50 m이고, 최소 3m, 최대 200m인 것으로 보고되었다. 계단상 리더의 평균진전속도는

1.5×10<sup>5</sup>m/s이며, 최소 1.0×10<sup>5</sup>m/s, 최대 2.6×10<sup>6</sup>m/s인 것으로 보고되었다.[8] 계단상 리더사이의 시간간격은 전자파의 전파경로와 측정 장소가 해상인지 또는 육지인지에 따라 다르게 나타나기도 한다. 대체적으로 리더의 초기에는 진전속도가 느리며, 마지막 단계 즉, 귀환뇌격 직전에는 대단히 빠른 속도로 진전한다.



(a) 전장 파형



(b) 자장 파형

그림 2 귀환뇌격 직전의 전장과 자장 파형의 예  
Fig. 2 Examples of the electric and magnetic field waveforms just before lightning return strokes

#### 3.2 계단상 리더에 의한 전장과 자장 파형의 통계

뇌운에서부터 귀환뇌격에 이르기까지의 전-구방전과정인 계단상 리더의 특성은 리더사이의 시간간격, 최종리더와 귀환뇌격사이의 시간간격, 최종리더와 귀환뇌격의 피크의 비, 리더의 50% 펄스폭 등으로 특징지어지며, 이들 파라미터는 리더의 진전과정과 밀접한 관련을 가지게 된다. 계단상 리더사이의 시간간격은 리더의 진전특성을 나타내며, 최종리더와 귀환뇌격의 시간간격은 뇌격거리 즉, 뇌보호설비의 보호범위를 결정하는 중요한 파라미터이다. 또한 최종리더와 귀환뇌격 피크비는 뇌운 중심의 높이와 뇌격지점까지의 수평거리에 대한 함수로의 표현할 수 있으므로 뇌운의 높이를 추정할 수 있다.[8] 그리고 리더는 매우 작고 빠른 펄스이므로 파도와 파미의 특성을 명확하게 분석할 수가 없으므로 50%펄스폭으로 그 특성을 나타내었다.

계단상 리더의 특성을 나타내는 파라미터의 정의를 그림 3에 나타내었으며, 귀환뇌격을 기준으로 귀환뇌격에 가장 가까운 리더를 P<sub>1</sub>으로 하여 역순으로 나타내었으며, 분석대상의

파라미터는 다음과 같다.

- ① 최종리더 펄스와 귀환뇌격사이의 시간간격, ( $t_0$ )
- ② 계단상 리더사이의 시간간격, ( $t_1, t_2, t_3, \dots$ )
- ③ 최종리더 펄스와 귀환뇌격의 피크비, ( $\frac{P_L}{P_R} \times 100$ )
- ④ 계단상 리더의 50%펄스폭 (Full Width at half maximum), ( $P_{FW}$ )

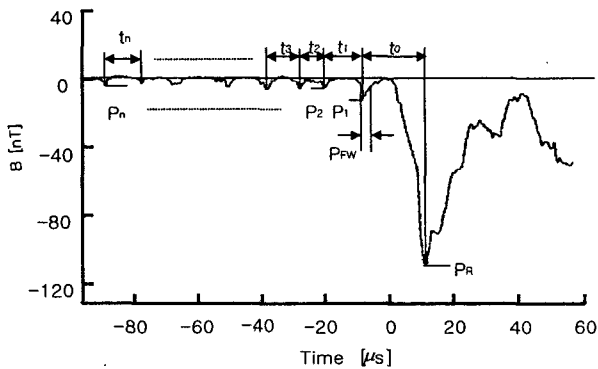


그림 3 계단상 리더에 의한 전자장 파형 파라미터의 정의  
 Fig. 3 Definition of the parameters of the electromagnetic field waveforms produced by the stepped leaders

3.2.1 최종리더에서 귀환뇌격까지의 시간간격

최종리더 펄스와 귀환뇌격의 피크사이의 시간간격( $t_0$ ) 즉, 최종리더에서 귀환뇌격까지의 시간의 분포를 그림 4에 나타내었으며,  $t_0$ 의 분포는 정극성과 부극성 모두 비슷한 양상을 보였고, 본 논문의 모든 그림에서 N은 분석대상의 데이터의 수, M은 산술평균,  $\sigma$ 는 표준편차를 나타낸 것이다. 본 논문에서의 극성은 대기중의 전장의 극성을 나타내는 일반적인 방법인 지구의 중심을 향하는 방향을 정극성으로 하였으며, 전장 파형으로 구별하였다. 본 연구결과는 대체로 귀환뇌격 이전 100 $\mu$ s 내외의 시간범위에서 발생한 계단상 리더 펄스에 대하여 중점적으로 분석하였다.

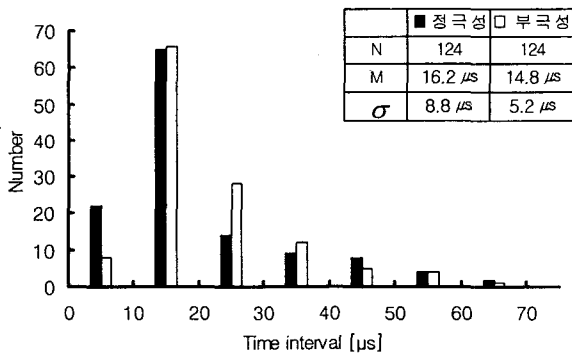


그림 4 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크사이의 시간간격( $t_0$ )의 분포 (N: 분석대상 데이터수, M: 평균,  $\sigma$ : 표준편차)  
 Fig. 4 Distributions of the time interval between the final leader pulse and the return stroke peak

최종리더와 귀환뇌격사이의 시간간격은 대체로 10~30 $\mu$ s 사이에 집중적으로 분포되어 있으며, 정극성 시간간격의 평균은 16.2 $\mu$ s, 표준편차 8.8 $\mu$ s이고, 부극성 시간간격의 평균은 14.8 $\mu$ s, 표준편차 5.2 $\mu$ s로 정극성과 부극성이 서로 비슷한 값을 나타내었다.

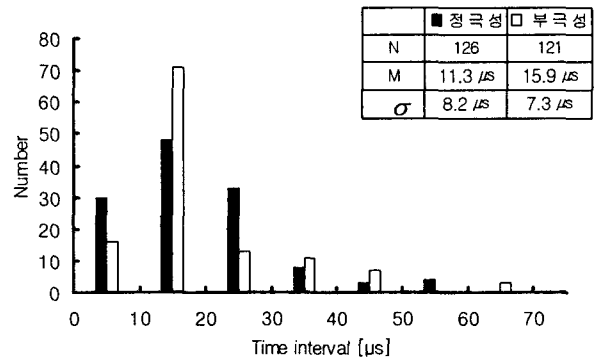
표 1 여러 연구자가 얻은 데이터의 비교

Table 1 Comparison of the data obtained by various workers

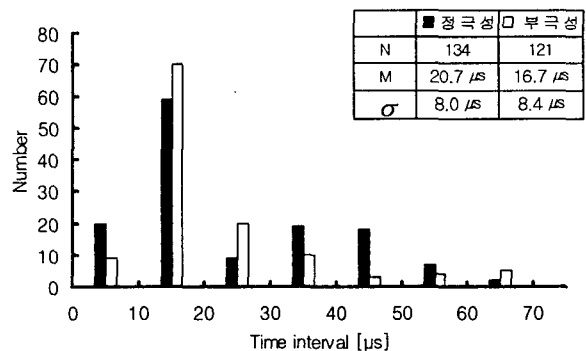
연구자	시간간격[ $\mu$ s]	표준편차[ $\mu$ s]	데이터 수	비고	
This work	정극성	16.2	$\pm 8.8$	124	Korea 온대성
	부극성	14.8	$\pm 5.2$	124	
Cooray & Lundquist[9]	8.9	$\pm 3$	134	Sri Lanka 열대성	
Krider, Weidman, Noggle[10]	11.0	$\pm 4.5$	263	Florida 아열대성	
Krider & Radda[11]	14.9	$\pm 6.2$	97	Florida 아열대성	

3.2.2 리더 펄스사이의 시간간격

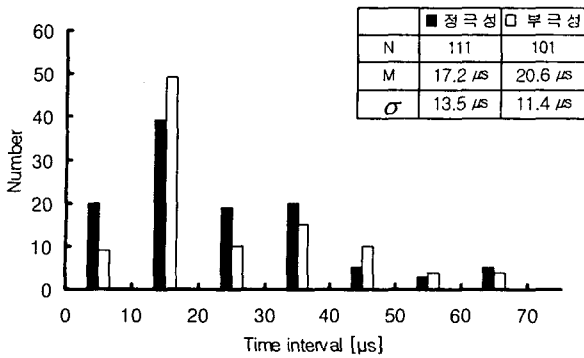
귀환뇌격 직전의 계단상 리더에 의해서 발생한 전자장 펄스의 시간간격의 분포를 그림 5에 나타내었으며, 귀환뇌격을 기준으로 하여 역순으로 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, ... 순으로 나타내었다.



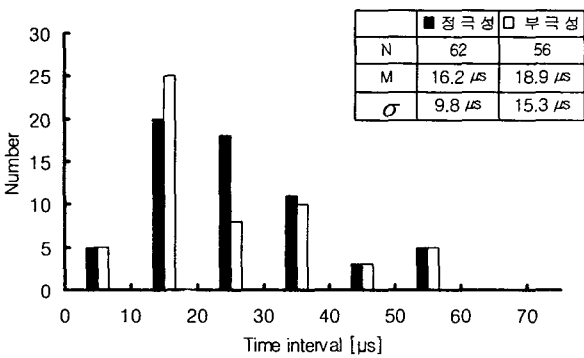
(a) P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub> 사이의 시간간격( $t_1$ )의 분포



(b) P<sub>2</sub>와 P<sub>3</sub> 사이의 시간간격( $t_2$ )의 분포



(c) P<sub>3</sub>와 P<sub>4</sub> 사이의 시간간격(t<sub>3</sub>)의 분포



(d) P<sub>4</sub>와 P<sub>5</sub> 사이의 시간간격(t<sub>4</sub>)의 분포

그림 5 계단상 리더펄스사이의 시간간격 분포  
Fig. 5 Distributions of the time interval between stepped leaders

최종리더(P<sub>1</sub>)와 바로 이전의 리더(P<sub>2</sub>)의 시간간격은 정극성에서 평균 11.3μs이고, 표준편차는 8.2μs이었고, 부극성의 시간간격은 평균 15.9μs이고, 표준편차가 7.3μs이다. 전반적으로 계단상 리더가 대기 가까이로 진전될수록 리더사이의 시간간격은 짧아졌으며, 빠른 속도로 진전된다. 리더 펄스사이의 시간간격에 대하여 다른 연구자가 측정한 결과와 본 연구 결과를 표 2에 비교하여 나타내었다.

표 2에 나타난 계단상 리더펄스사이의 시간간격에 대한 본 연구의 측정결과는 최종리더에서 귀환뇌격까지의 시간간격과 마찬가지로 Cooray와 Lundquist가 열대지방인 Sri Lanka에서 측정한 결과보다는 길게 나타났지만 Krider 등이 Florida에서 측정한 결과 그리고 Hojo 등이 일본에서 측정한 결과와는 거의 비슷하였다. Florida에서의 결과는 측정자 또는 측정 시기에 따라 측정결과가 큰 차이를 보이고 있으며, 이것은 귀환뇌격의 전구방전특성이 측정장소의 기후와 지형, 계절, 뇌운의 규모 등에 의존함을 알 수 있다. 그러나 이들 측정결과와 대략적인 값은 대부분 표준편차 범위에 분포되어 있다. 또한 귀환뇌격 이전의 전구방전과정인 계단상 리더의 특성 즉, 진전속도와 진전거리 등이 뇌운 가까이인 발생초기와 대기 가까이에서의 특성이 다르며, 대기 가까이에서의 리더펄스는 크고 시간간격이 짧다. 본 연구결과는 귀환뇌격 이전 100 μs 내외의 시간범위에서 발생한 계단상 리더펄스를 분석의 대상으로 하였으며, 이와 같은 측정결과와 차이는 계단상 리더의 특성분석 범위에 따라서도 발생할 수가 있다.

표 2 여러 연구자가 측정한 계단상 리더펄스사이의 시간간격의 비교

Table 2 Comparison of the time interval between stepped leaders measured by various workers

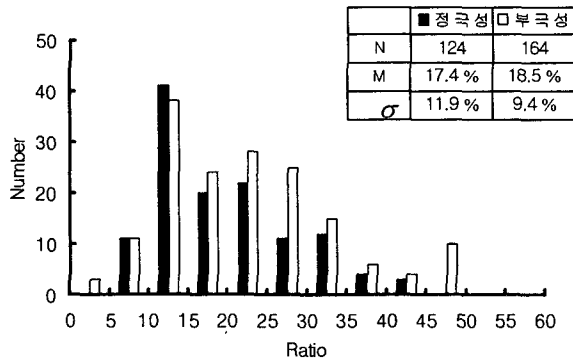
연구자	시간간격 [μs]	표준편차 [μs]	데이터 수	비고	
This work	정극성	16.1	±9.4	474	Korea
	부극성	17.3	±9.5	424	
Cooray & Lundquist[9]	12.2	±3.5	280	Sri Lanka	
Hojo et al.[12]	정극성	17.4	—	—	Japan
Cooray & Lundquist[13]	정극성	26	±6	96	Sweden
	부극성	14	±4	179	
Krider, Weidman, Noggle[10]	15.9	±6.5	997	Florida	
	25.3	±8.7	130	Florida	
Krider, Radda[11]	13.7	±4.8	92	Florida	

3.2.3 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비

최종리더 펄스와 귀환뇌격의 피크의 비는 뇌운 중심의 높이와 이상적인 도전채널 즉, 수직 채널로부터 관측지점까지의 수평거리와의 함수로 나타낼 수 있다.[8,14] 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비는 지표면으로부터 뇌운 중심까지의 높이와 뇌운 중심으로부터 관측지점까지의 비에 반비례한다. 이론적으로 근접뢰의 경우 리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비는 부(-)의 값이 되며, 관측지점이 무한히 먼 경우는 1이 된다. 따라서 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비를 측정하고 뇌격지점으로부터 관측지점까지의 거리를 알면 뇌운의 중심의 높이를 산출할 수가 있다. 또한 귀환뇌격 전류의 피크값은 대기 가까이까지 진전되어온 길이가 수 백 미터인 리더채널 상에 존재하는 전하에 의하여 결정되므로 귀환뇌격의 피크와 대기 가까이까지 진전된 최종리더 펄스의 크기의 상관관계는 매우 중요하다.

최종리더 펄스와 귀환뇌격의 전장 파형의 피크의 비를 그림 6에 나타내었다. 정극성의 평균은 17.4%이고 표준편차는 11.9%이며, 그리고 부극성의 평균은 18.5%이고 표준편차는 9.4%이었다. 최종리더 펄스와 귀환뇌격의 전장 파형의 피크의 비는 양극성 모두 10~35%사이에 집중적으로 분포되어 있다. Krider 등은 미국에서 측정한 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비에 대한 실험결과를 발표하였으며, Florida에서 측정한 182개의 데이터에 대하여는 0.13±0.008, 그리고 Arizona에서 측정한 63개의 데이터에 대한 결과는 0.07±0.05 이었다. 이러한 차이는 다음의 두 가지 원인으로 분석하였다. 먼저 Florida는 해양성 기후이며, 해상에 귀환뇌격이 발생한 경우에 측정한 결과이다. 이에 반하여 Arizona는 내륙으로 대륙성 기후이고 낙뢰지점과 관측점 사이의 거리도 대체적으로 20~50km 정도로 비교적 근거리 낙뢰의 특성에 해당한다. 따라서 Arizona에서는 전자장의 전파의 효과(effect of propagation)가 Florida보다 크기 때문에 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비가 작게 나타난 것으로 설명하고 있다.[10]

Cooray와 Lundquist가 열대지방인 Sri Lanka에서 측정된 14개의 데이터에 대한 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비의 결과는  $0.1 \pm 0.03$ 이었다. 이와 같이 연구자들에 따라 측정값이 다른 것은 지역에 따라 뇌운의 규모나 진전과정에 관련된 귀환뇌격 고유특성의 차이점도 있겠지만 낙뢰지점과 관측점사이의 거리에 따른 전자장의 전파(propagation)의 영향이 크게 나타나므로 관측거리를 고려하지 않은 단순한 크기 비율만의 절대 비교는 큰 차이를 나타낼 수도 있다.



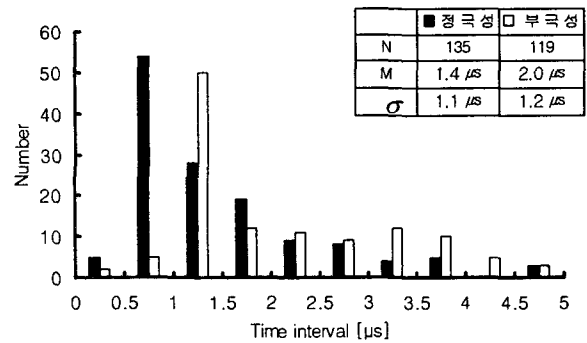
1림 6 최종리더 펄스와 귀환뇌격 피크의 비의 분포  
 Fig. 6 Distributions of the ratio of the final leader pulse to the lightning return stroke peak

3.2.4 계단상 리더의 50% 펄스폭

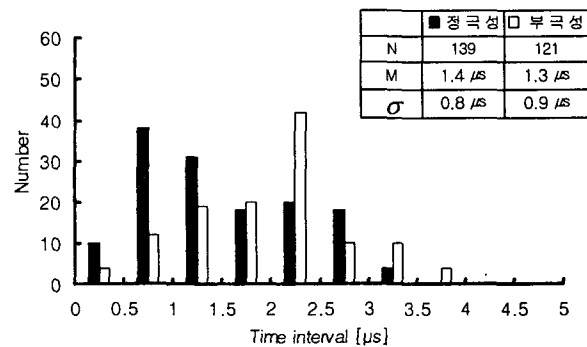
귀환뇌격 직전의 뇌방전 진전과정인 계단상 리더는 미세한 펄스로 나타나기 때문에 펄스의 파두, 파미의 특성이 분명하게 나타나지 않으므로 이러한 특성을 평가하는 것은 매우 어렵다. 따라서 리더펄스의 특성을 평가하기 위하여 리더 펄스 폭의 피크치의 50%에 상당하는 50% 펄스폭(pulse width at half maximum)을 통계적으로 분석하였다. 이 역시 귀환뇌격을 기준으로 하여 역순으로 순서를 정하였다. 즉, 귀환뇌격을 기준으로 최종리더 펄스를 P<sub>1</sub>로 정의하였으며, 그림 7에 계단상 리더에 의한 전장 파형의 50% 펄스폭 분포를 나타내었다.

리더의 50%펄스폭은 정극성의 경우  $1.4 \pm 0.9 \mu s$ , 부극성에서  $1.2 \pm 1.2 \mu s$ 이었으며, 전체 50%펄스폭은 평균  $1.8 \mu s$ 이며, 계단상 리더의 순서에 대한 의존성은 거의 나타나지 않았다. Krider 등이 다른 문헌에서 제시한 결과를 보면[15], Florida에서 측정된 346개의 계단상 리더의 50%펄스폭은  $0.74 \pm 0.26 \mu s$ 이고, Arizona에서 358개의 측정된 값은  $0.74 \pm 0.23 \mu s$ 으로 거의 대등한 펄스폭을 나타내었으며, 이들 데이터는 최소 0.2  $\mu s$ 에서 최대 약 2  $\mu s$ 사이에서 분포되어 있다. 또한 Krider와 Radda는 Florida와 Arizona 등지에서 귀환뇌격 이전에 발생한 계단상 리더의 특성을 중점적으로 분석한 논문에서 리더의 50%펄스폭의 분포를 발표하였다.[11] 이들은 최종리더와 최종리더 이전의 리더, 그리고 전체의 특성을 분류하여 분석하였으며, 계단상 리더의 50%펄스폭은 0.2  $\mu s$ 에서 10  $\mu s$ 의 범위에 분포되어 있으며, 145개의 계단상 리더의 50%펄스폭은 평균  $3.5 \pm 1.8 \mu s$ 이었다. 귀환뇌격이 발생하기 직전의 최종리더의 50%펄스폭은 69개의 데이터에 대하여  $2.2 \pm 1.3 \mu s$ 이었으며, 최종리더를 제외한 다른 계단상 리더 96개의 50%펄스폭은 평균  $2.3 \pm 1.2 \mu s$ 임을 발표하였다.

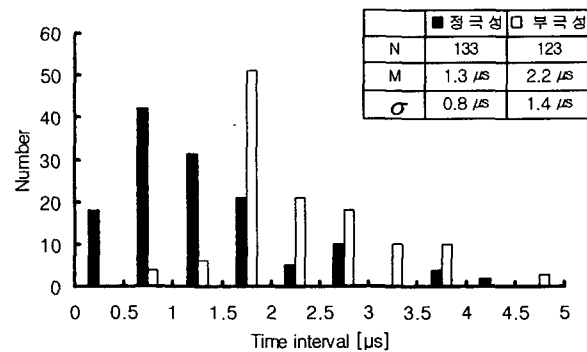
이와 같이 본 연구를 비롯하여 여러 연구자들의 측정결과가 다르게 나타났으며, 리더의 펄스폭에 영향을 미치는 요인으로는 원거리 귀환뇌격의 경우 전자파가 진전하는 동안 전자장의 왜곡 즉, 전파에 의한 전자장 파형의 변형을 생각할 수 있는데, 이로 인하여 차이가 발생할 수 있다. 또한 내륙에서 발생한 귀환뇌격 이전의 계단상 리더에 의한 전자장 파형은 해상에 발생한 것과 다를 수 있으며, 귀환뇌격의 규모와 진전과정의 특성에 따라 변화무쌍하게 나타낼 수도 있다. 따라서 여러 연구자들이 측정된 결과의 차이는 오차일 가능성보다는 관측거리 또는 귀환뇌격 고유의 불규칙한 특성 때문에 일어날 수 있는 50%펄스폭의 범위라고 생각할 수도 있다.



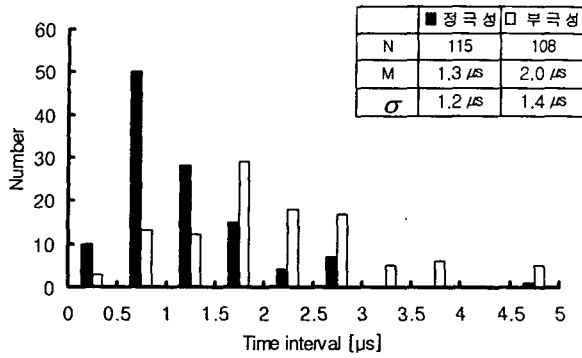
(1) P<sub>1</sub>의 펄스폭의 분포



(2) P<sub>2</sub>의 펄스폭의 분포



(3) P<sub>3</sub>의 펄스폭의 분포



(4) P<sub>4</sub>의 펄스폭의 분포

그림 7 계단상 리더에 의해서 발생한 전장 파형의 50% 펄스폭의 분포

Fig. 7 Distributions of the pulse width at half maximum of the electric field waveforms produced by the stepped leaders

#### 4. 결 론

너보호설비의 보호범위결정에 중요한 파라미터가 되는 귀환뇌격 직전에 발생한 계단상 리더에 의해 방사된 전장 파형의 특성을 통계적으로 분석한 바 다음과 같은 결론을 얻었다. 귀환뇌격 이전에 리더는 계단상으로 진전하며, 리더펄스의 크기는 대지가 가까이 진전할수록 증가하는 특성을 나타내었다. 귀환뇌격의 진전과정에서 최종리더와 귀환뇌격사이의 시간간격의 극성의존성은 거의 나타나지 않았으며, 대부분 10~30μs 범위에 분포되어 있다. 최종리더와 귀환뇌격의 피크비는 전장의 경우 17.4±11.9%, 부극성 18.5±9.4%이었다. 계단상 리더의 50% 펄스폭은 부극성의 경우가 더 크게 나타났으며, 본 연구에서 측정된 계단상 리더 특성은 해외에서 1)보고된 것들과 큰 차이는 없었다. 귀환뇌격 직전의 계단상 리더의 특성은 너보호설비의 설계데이터 산출에 유용한 기초자료로 활용될 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2001학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.(INHA-22004)

#### 참 고 문 헌

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

[3] M. Ishii and J. Hojo, "Statistics on Fine Structure of Cloud-to-Ground Lightning Field Waveforms", J. Geophys. 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. Geophys. Res., Vol.85, No.C3, pp.1571~1583, 1980.3.  
 [5] M. A. Uman, "Lightning Return Stroke Electric and magnetic Fields", J. Geophys. Res., Vol.90, No.D4, pp.6121~6130, 1985.6.  
 [6] 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, Pt.1, No.1, pp.299~306, 2001. 1.  
 [7] B. H. Lee, D. M. Lee, S. C. Lee and C. H. Ahn, "Statistical properties of Electric Fields Produced by Cloud-to-Ground Return Strokes", KIEE Int. Trans. on EA, Vol.11C, No.4, pp.120~126, 2001.12.  
 [8] M. A. Uman, "Lightning", Dover Publications Inc., New York, pp. 1~43, 47~68, 216~222, 1982  
 [9] V. Cooray and S. Lundquist, "Characteristics of the Radiation Fields From Lightning in Sri Lanka in the Tropics", J. Geophys. Res., Vol.90, No.D4, pp.6099~6109, 1985  
 [10] E. P. Krider, C. D. Weidman, and R. C. Noggle, "The Electric Fields Produced by Lightning Stepped Leaders", J. Geophys. Res., Vol.82, No.6, pp.951~960, 1977.  
 [11] E. P. Krider and G. J. Radda, "Radiation Field Wave Forms Produced by Lightning Stepped Leaders", J. Geophys. Res., Vol.80, No.18, pp.2653~2657, 1975.  
 [12] J. Hojo, M. Ishii, T. Kawamura, F. Suzuki and R. Funayama, "The Fine Structure in the Field Change Produced by Positive Ground Strokes", J. Geophys. Res., Vol.90, No. D4, pp.6139~6143, 1985  
 [13] V. Cooray and S. Lundquist, "On the Characteristics of Some Radiation Fields From Lightning and Their Possible Origin in Positive Ground Flashes", J. Geophys. Res., Vol.87, No.C19, pp.11,203~11,214, 1982.  
 [14] M. A. Uman and E. P. Krider, " A Review of Natural Lightning : Experimental Data and Modelling ", IEEE Trans., Vol.EMC-24, No.2, pp.79~105, 1982.  
 [15] E. P. Krider, G. J. Radda, and R. C. Noggle, "Regular Radiation Field Pulses Produced by Intracloud Lightning Discharges", J. Geophys. Res., Vol.80, No.27, pp.3801~3804, 1975

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 Cincinnati 대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기 공학부 교수. 인하대학교 차세대고전압전력기술연구센터 소장  
Tel. (032) 860-7398, Fax.(032) 863-5822  
e-mail : bhlee@inha.ac.kr



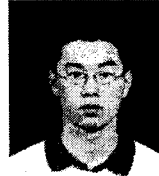
**이동문 (李東汶)**

1958년 4월 20일생. 1987년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 8월 인하대 대학원 졸업(공학석사). 2002년 2월 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 한진중공업 차장.  
e-mail : lidm7@hanmail.net



**정동철 (鄭東哲)**

1964년 9월 18일생, 1989년 2월 영남대 전기 공학과 졸업, 2002년 2월 고려대학교 산업대학원 졸업(공학석사), 현재 한진중공업주식회사 근무, 인하대 대학원 전기공학과 박사과정  
e-mail : dcjeong@korea.com



**장근철 (張根喆)**

1976년 10월 12일생. 2002년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정  
e-mail : dothebest95@hotmail.com



**이승철 (李承七)**

1943년 4월 1일생. 1971년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 서울산업대 산업대학원 안전공학과 졸업(공학석사), 2002년 2월 인하대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한진중공업주식회사 근무.  
e-mail : sclee@hjnst.co.kr



**정광희 (鄭廣熙)**

1975년 12월 10일생. 2000년 8월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 삼성전자 연구원 근무.  
e-mail : jkhee01@sec.samsung.com