

운방전에 의해 발생한 전기와 자기 파형의 파라미터 분석

(Parametric Analysis of the Electric and Magnetic Field Waveforms Produced by Intracloud Lightning Discharges)

이복희* · 이우철

(Bok-Hee Lee · Woo-Chul Lee)

요 약

본 연구에서는 뇌방전의 전기적 특성에 대해 파악하고자 전기 및 자기 측정시스템을 구축하였다. 주파수 대역 및 응답감도는 전기측정시스템 40[Hz]~2.6[MHz], 2.1[(V/m)/mV], 자기 측정시스템 300[Hz]~1[MHz], 2.8[nT/mV]이다. 구축한 측정시스템을 이용하여 뇌방전에 의해 발생한 전기와 자기 파형을 관측하고, 파형의 여러 가지 파라미터에 대해 통계적으로 분석하였다. 그 결과 전기와 자기 파형은 극성의존성이 미약하였으며, 전기와 자기의 상승시간과 영점교차시간의 평균값은 각각 5.5[μ s], 21[μ s]로 나타났다.

Abstract

In this study, the electric and magnetic fields measuring system were designed and fabricated to investigate the electric characteristics of lightning discharges. Frequency bandwidth of electric field measuring system ranges from 40[Hz] to 2.6[MHz] and its response characteristic is 2.1[(V/m)/mV]. Frequency bandwidth of magnetic field measuring system ranges from 300[Hz] to 1[MHz] and its response characteristic is 2.8[nT/mV]. Electric and magnetic fields due to intracloud lightning discharges were observed and their waveform parameters were statistically analyzed. As a result, waveform parameters of electric and magnetic fields are nearly independent of polarity. The mean rise times and the zero-crossing times of electric and magnetic fields are approximately 5.5[μ s] and 21[μ s], respectively.

Key Words : Lightning flash, Electric field, Magnetic field, Lightning return stroke, Intracloud lightning discharge, Waveform parameter

1. 서 론

최근 정보화 기기의 보급으로 전력공급의 신뢰도 향상이 한층 더 요구되고 있으며 전력계통의 내뢰특성에 대한 중요성은 더욱 부각되고 있어 뇌사고의 발생원인 및 뇌방전의 각종 파라미터를 파악하여 적절한 보호대책을 강구하여야 한다. 낙뢰에 관련된

* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2005년 12월 12일
1차심사 : 2005년 12월 13일
심사완료 : 2005년 12월 29일

운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터 분석

물리적 현상에 대한 연구는 운방전에 비하여 인축의 사망, 손상, 전력 및 통신설비에의 장애, 산불재해 등 실제적으로 중대한 사고를 유발시키므로 많이 이루어져 왔다[1-5]. 최근 많이 보급된 정보통신기기를 비롯한 전자기기의 EMI/EMC 측면에서 보면 운방전에 의해서도 강력한 고주파 성분의 전자파가 발생하므로 이에 대한 정확한 원인 분석과 대책에 관한 연구가 필요하다. 뇌전류가 흐르게 됨으로써 유도 및 방사되는 전계와 자계 파형은 전류 파형에 관한 정보와 상관성을 가지고 있으므로 전계와 자계 파형의 변화를 정확하게 측정하고 그의 유도, 방사, 전파 기구를 해석하게 되면 방사원인 전류 파형의 복원도 원리적으로 가능하다. 외국에서는 뇌방전 파라미터에 관해 활발히 연구하고 있지만 국내에서는 이에 대한 연구가 비교적 미흡한 실정이다[6-8]. 뇌방전 특성은 기후와도 직접적으로 관련이 있으며, 지역에 따라서도 다르므로 한반도에서 발생한 뇌방전에 전 자계 영향에 대한 활발한 연구가 요망된다.

따라서 본 연구에서는 운방전에 의해 발생하는 전 계와 자계 파형의 특성을 통계적으로 분석하기 위해 서 광대역 전계와 자계 측정시스템을 구성하였다. 구성된 전계와 자계 측정시스템의 기본특성을 파악 하고, 2004년과 2005년 하절기에 인천지역 근방에서 발생한 운방전에 의한 전계와 자계를 측정하였다. 측정된 전계와 자계 파형의 상승시간, 영점교차시간, 반전달의 깊이, 펄스폭 등의 파라미터를 분석하고 검토하였다.

2. 측정시스템의 구성

2.1 평판형 전계센서 및 루프형 자계센서

평판형 전계센서 및 루프형 자계센서의 사진을 그림 1에 나타내었다. 평판형 전계센서이므로 우천시 위판에 물이 고이는 비와 눈, 바람 등의 영향에 의해 측정에 오차가 생길 수 있으므로 센서를 플라스틱 덮개로 보호하였다.

전계 센서는 직경 253[mm], 전극과 접지극 사이 간격 3[mm]이며, 전극과 접지극 사이의 정전용량 C 는 2.6[nF]이다. 자계 센서는 한 변이 253[mm]이며,

자속 쇄교면적 64,000[mm²]를 갖는 루프형 센서로 구성하였다. 두개의 루프 센서는 직교하며, 각각의 센서는 6턴과 2턴으로 이루어져 다른 응답감도를 갖고 있다. 자계 센서의 인덕턴스와 저항은 각각 21[μH] 1.5[Ω], 3[μH] 0.6[Ω]이다.

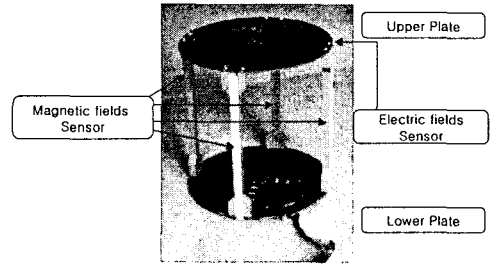


그림 1. 전계 및 자계 센서의 사진
Fig. 1. Photo of the electric and magnetic fields sensor

2.2 측정시스템의 구성

본 측정시스템은 주위에 있는 상용전원 60[Hz]의 영향을 최소화하기 위해 인하대학교 건물의 옥상 16 층에 설치하였다. 센서에서 데이터취득시스템까지는 약 40[m]정도 떨어져 있으며, 특성임피던스가 50 [Ω]인 동축케이블로 연결하였으며, 본 측정시스템의 구성도를 그림 2에 나타내었다.

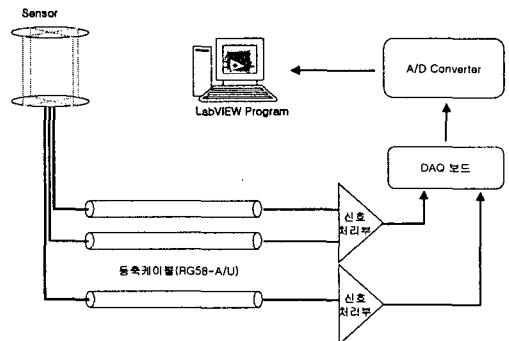


그림 2. 측정시스템 구성도
Fig. 2. Block diagram of the measurement system

신호처리부인 전압버퍼로는 입력임피던스가 약 10¹²[Ω]으로 대단히 크며, 응답속도가 12[V/μs]인 연산증폭기 LF356을 사용하였다. 능동성 적분기로는

응답속도가 $1200[V/\mu s]$ 로 매우 높고, 주파수 대역이 $220[MHz]$ 인 연산증폭기 LM7171을 사용해 측정된 미분신호를 차동증폭 및 적분을 하여 실제의 신호로 변환시켰으며, 전압버퍼와 능동성 적분기의 회로도 를 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

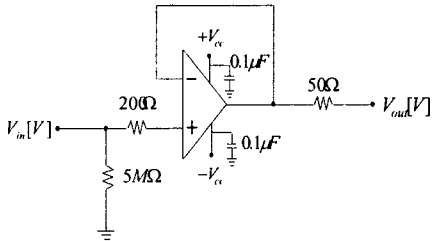


그림 3. 전압버퍼회로
Fig. 3. Circuit diagram of the voltage follower

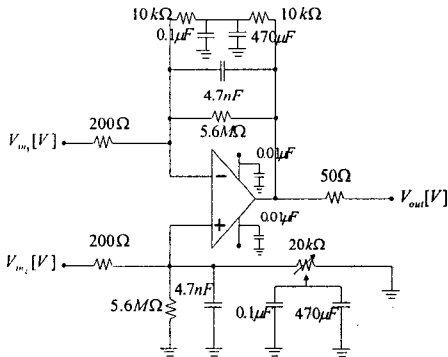


그림 4. 능동성 적분기회로
Fig. 4. Circuit diagram of the active integrator

전계와 자계 센서에 의해 검출된 신호는 12[bits]의 해상도와 샘플링 시간이 10[MS/s]이며, 기록시간이 10[ms]인 데이터 취득장치에 전송되어 저장된다. 또한 측정된 신호는 LabVIEW 프로그램을 이용하여 전계와 자계 파형의 파라미터를 분석하게 되며, 이에 따른 파형 및 파라미터 분석의 정확도를 향상시킬 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전계와 자계 파형 및 파라미터의 정의

뇌운 안에 있는 P(+)-전하와 N(-)-전하 사이에서 발

생하는 방전현상을 운내방전 또는 운간방전이라 하며, 이들의 특성은 거의 유사한 것으로 알려져 있다. 그림 5에 운방전에 의해서 발생한 전자계 파형 및 파라미터의 정의에 대해 나타내었으며, 낙뢰에 의하여 발생한 파형과는 특성이 매우 다름을 알 수 있다. 운방전시 발생하는 전자계 파형의 특징을 살펴보면 주방전이 일어나기 전에 낙뢰와 마찬가지로 리더가 나타나며, 낙뢰시의 리더보다 긴 시간간격으로 발생하였다[9]. 또한 낙뢰에 의해서 발생한 전자계 파형과 다르게 양극성(bipolar)의 진동을 나타내는 특징이 두드러지게 나타났다[10]. 운방전에 의해 발생한 전자계 파형은 고주파의 미세한 펄스를 포함하고 있으므로 방사성분이 주로 나타났다. 운방전은 대부분 제1뇌격으로 끝나지 않고 후속뇌격이 발생하는 다중 펄스의 형태로 관측되었다.

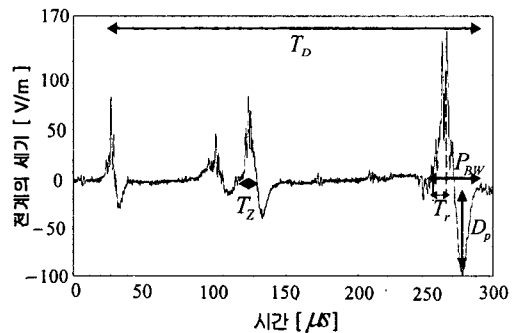


그림 5. 운방전에 의해 발생한 전자계 파형 및 파라미터
Fig. 5. The electric and magnetic field waveform produced by intracloud lightning discharges and parameters

운방전에 의해서 발생하는 다중 전자계 펄스는 방전이 진전하는 동안의 지속시간, 한 이벤트당 총 펄스 수, 최대 피크치의 50[%]이상인 펄스 수, 최대 피크치의 33[%]이상인 펄스 수, 상승시간, 영점교차시간, 펄스폭, 반전값 깊이 등의 파라미터를 분석함으로써 운방전에 의해 발생된 전계와 자계 파형의 특성에 대해서 알아볼 수 있었다. 분석 대상은 2004년부터 2005년 사이에 운방전에 의하여 발생한 전계와 자계 파형으로 하였으며, 노이즈 성분이 심하거나 데이터로 명확하게 구분이 가지 않는 것들은 분석대상에서 제외시켰다.

3.2 전계와 자계 파형 파라미터의 분석

운방전에 의해서 발생하는 전자계 파형은 낙뢰에 의한 것과 같이 급격하게 변동하는 파형이 발생하지 않고 임펄스성의 양극성 펄스가 주로 발생하였다. 이와 같이 운방전에 의한 전자계 파형은 양극성의 펄스 형태의 파형이므로 운방전에 의한 전자계 파형의 특성은 크게 영점교차시간과 펄스폭에 대한 파라미터로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 분석대상으로 정한 운방전의 이벤트 수는 정극성의 경우 7개, 부극성의 경우 23개의 이벤트를 대상으로 하였다. 펄스 수로는 정극성의 경우 20개, 부극성의 경우 74개의 펄스를 대상으로 분석하여 표 1과 같은 결과를 도출하였다.

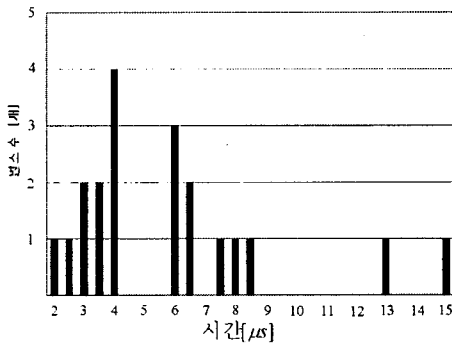
정극성 운방전의 경우 평균 지속시간은 1.6[ms]이고, 총 펄스 5.4개이며, 부극성 운방전의 경우 지속시간 1.3[ms]이고, 총 펄스 수는 6.8개이었다. 또한 부극

성 운방전은 정극성 운방전에 비해 지속시간은 대체적으로 짧으나 펄스 수는 오히려 더 많이 발생하였다.

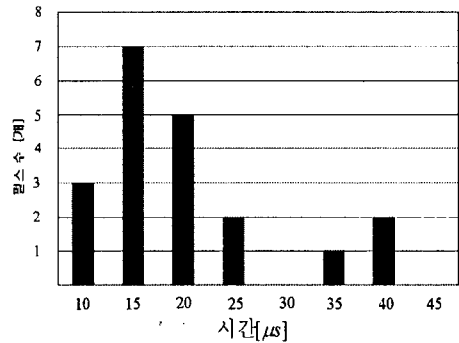
표 1. 운방전에 의해 발생한 전계와 자계 펄스의 특성비교

Table 1. Comparison of the characteristics of electric and magnetic field pulses due to intracloud lightning discharges

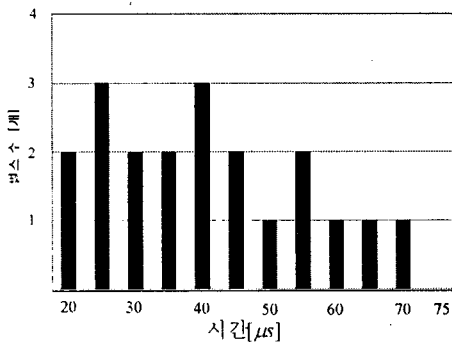
	정극성		부극성	
	평균	표준 편차	평균	표준 편차
지속시간[ms]	1.6	0.6	1.3	0.5
총 펄스 수[개]	5.4	1.9	6.8	1.9
최고 피크치의 50[%] 이상인 펄스 수[개]	1.9	0.8	1.9	1.0
최고 피크치의 33[%] 이상인 펄스 수[개]	2.9	1.5	3.2	1.1



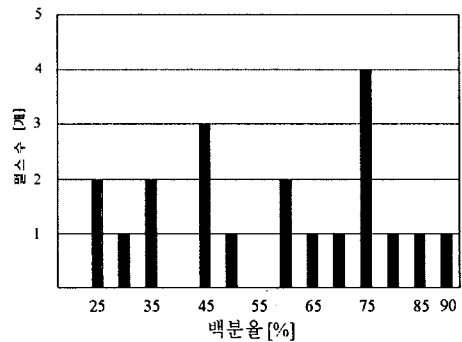
(a) 상승시간



(c) 영점교차시간



(b) 펄스폭



(d) 반전깊이

그림 6. 정극성 운방전에 의해 발생한 자계의 파라미터 분포

Fig. 6. Histograms of the parameters of magnetic field waveforms produced by positive intracloud lightning discharges

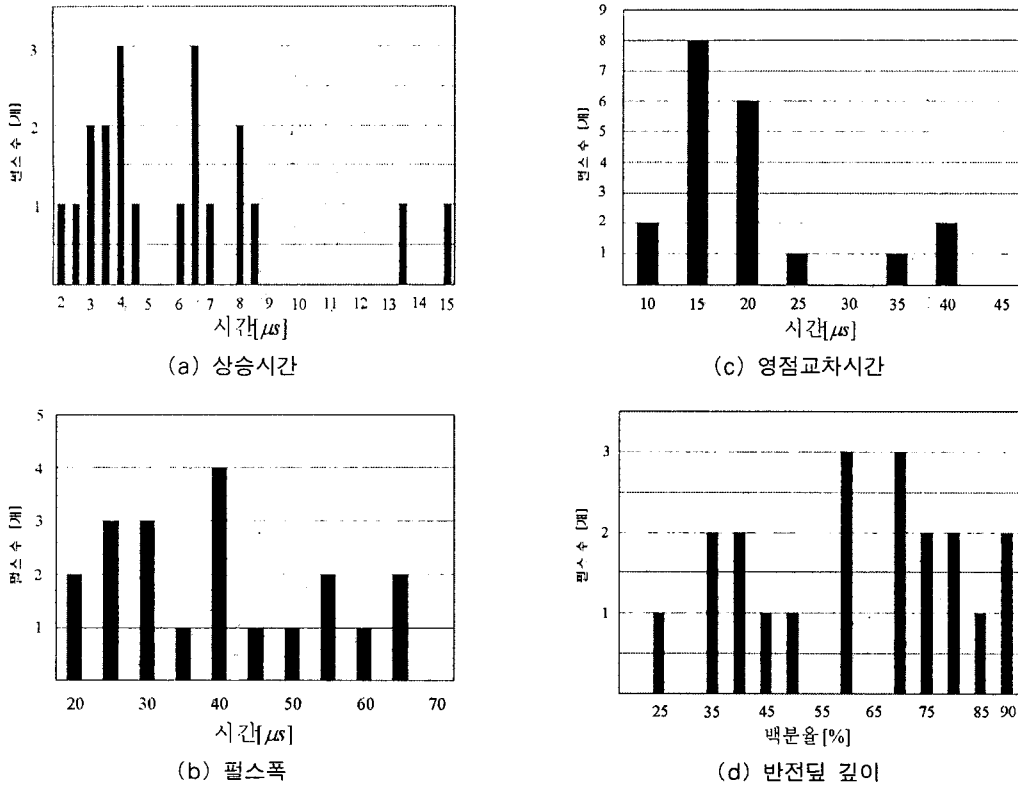


그림 7. 정극성 운방전에 의해 발생한 전계의 파라미터 분포

Fig. 7. Histograms of the parameters of electric field waveforms produced by positive intracloud lightning discharges

본 연구에서는 최고 피크치의 33[%]이상인 전자계 펄스를 대상으로 하여 운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터를 통계적으로 분석하였다. 정극성과 부극성의 운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 상승시간, 펄스폭, 영점교차시간, 반전될 깊이의 파라미터 분포를 각각 그림 6~9에 나타내었다.

정극성 운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터의 평균값을 비교해 보면 자계 파형의 경우 상승시간 5.8[μs], 펄스폭 40.5[μs], 영점교차시간 20.0[μs], 반전될 깊이 57.3[%]를 보였으며, 전계 파형의 경우 상승시간 6.0[μs], 펄스폭 39.8[μs], 영점교차시간 20[μs], 반전될 깊이 61.8[%]의 결과를 나타내었다.

부극성 운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형

의 파라미터를 평균값으로 비교해 보면 자계 파형의 경우 상승시간 5.5[μs], 펄스폭 46.1[μs], 영점교차시간 21.5[μs], 반전될 깊이 54.8[%]를 보였다. 전계 파형의 경우 상승시간 5.4[μs], 펄스폭 45.6[μs], 영점교차시간 22.0[μs], 반전될 깊이 55[%]의 결과를 보였다.

운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터 비교를 표 2에 나타내었다. 전계와 자계 파형이 거의 차이가 없는 것으로 보아 방사성분이 지배적인 것을 알 수 있으며, 극성에 대한 의존성이 매우 미약한 것으로 나타났다.

본 연구에서 측정한 실험 결과와 Florida, Japan, Sri Lanka에서 측정한 실험 결과를 표 3에 나타내었다. Arizona에서 측정된 실험 결과는 영점교차시간이 아닌 전자계 파형의 초기 반주기의 반치폭(Full

운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터 분석

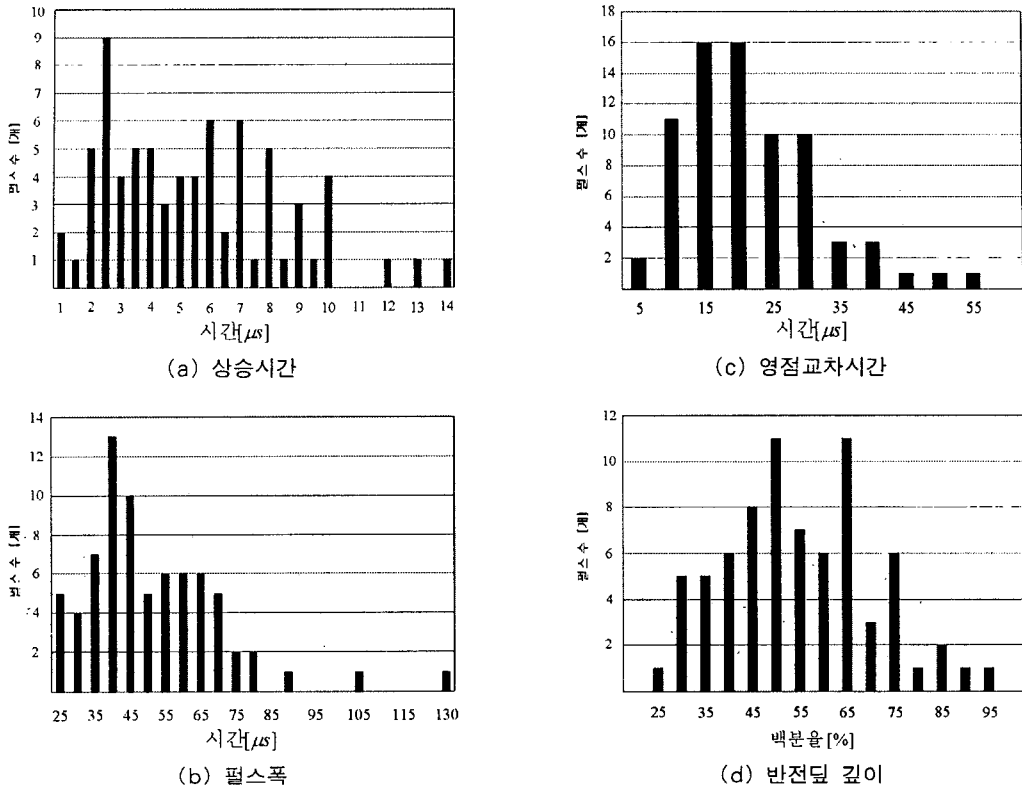


그림 8. 부극성 운방전에 의해 발생한 자계의 파라미터 분포
 Fig. 8. Histograms of the parameters of magnetic field waveforms produced by negative intracloud lightning discharges

width at half maximum)의 값을 분석하였으며, 대체적으로 1~20[μ s]의 범위 안에 들어 있다. Weidman과 Krider가 플로리다에서 측정한 운방전에 의해 방사된 전자파 펄스는 파두 부분이 완만하게 상승하였으며, 초기 반주기의 지속시간은 약 10 [μ s]이었다[11]. 그리고 Krider, Radda, Noggle는 플로리다와 아리조나에서 운방전에 의해 방사되는 전자파 펄스 파형의 특성에 대한 연구결과를 보고하였다[12]. Cooray와 Lundquist는 열대지방인 스리랑카에서 발생하는 운방전에 의한 전자계 파형의 영점교차시간을 분석하였으며, 26개의 파형에 대한 평균 영점교차시간은 13 \pm 4.9[μ s]이었다[13].

표 2. 운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터 비교 I

Table 2. Comparison I of parameters of the electric and magnetic field waveforms produced by intracloud lightning discharges

	정극성		부극성	
	전장	자장	전장	자장
상승시간[μ s]	6.0	5.8	5.4	5.5
반전깊이[%]	61.8	57.3	55.0	54.8
영점교차시간[μ s]	20.0	20.0	22.0	21.5
펄스폭[μ s]	39.7	40.5	45.6	46.1

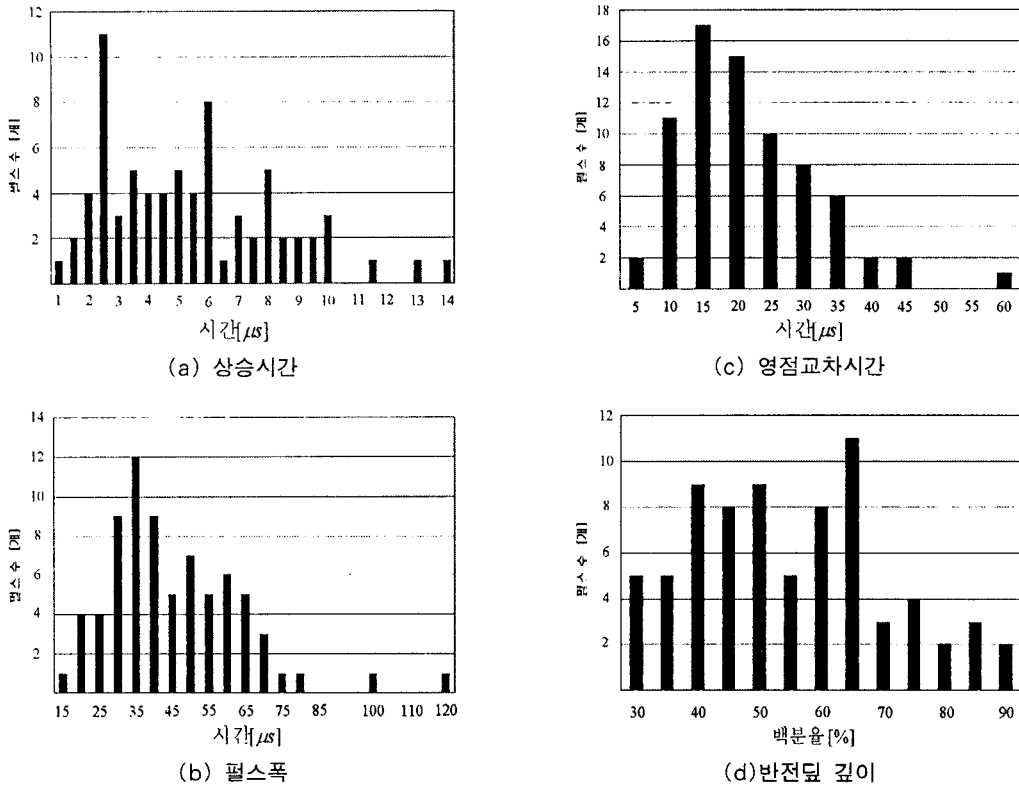


그림 9. 부극성 운방전에 의해 발생한 전계의 파라미터 분포
 Fig. 9. Histograms of the parameters of the electric field produced by negative intracloud lightning discharges

표 3. 운방전에 의해 발생한 전계 및 자계 파형의 파라미터 비교 II
 Table 3. Comparison II of parameters of the electric and magnetic field waveforms produced by intracloud lightning discharges

	영점교차 시간[μ s]		펄스폭 [μ s]		반전된 깊이[%]	
	극성		극성		극성	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
Incheon	20	22	40	46	61	55
Florida[12]	12~18		26~35		75~81	
Sri Lanka[13]	13		75			

아열대 해양성 기후인 플로리다 케네디 우주센터

에서 Weidman과 Krider가 운내방전에 의한 전자계 파형의 펄스폭의 특성을 분석하였다. 정극성 117개 파형의 펄스폭은 $41 \pm 13[\mu\text{s}]$ 이었으며, 부극성 137개 파형의 펄스폭은 $63 \pm 39[\mu\text{s}]$ 인 것으로 나타났다. Cooray와 Lundquist가 스리랑카에서 관측한 23개의 파형에 대한 펄스폭은 $75 \pm 25.9[\mu\text{s}]$ 로 나타났다. 본 연구에서 분석한 결과는 같은 해안지역인 플로리다의 결과와는 비슷하게 나타났지만, 스리랑카에서 분석한 결과와는 약간의 차이가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 운방전에 의해 발생하는 전계와 자계 파형을 측정하고, 이들 파형의 특성과 파라미터를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형의 파라미터 분석

기록시간이 10[ms]인 데이터취득시스템을 이용하여 최초 뇌격발생 이후 후속뇌격에 의해 발생하는 전계 및 자계 파형을 측정할 수 있으며, LabVIEW 프로그램으로 전계와 자계 파형의 파라미터를 분석함으로써 데이터 분석에 한층 더 신뢰도를 증가시켰다. 운방전에 의해 발생한 전계와 자계 파형은 거의 같아 방사성분이 지배적이었으며, 양방성 진동형태를 나타내었다. 또한 운방전에 의한 전자계 파형과 파라미터의 극성의존성은 거의 나타나지 않았다.

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업에 의해 작성되었습니다.

References

[1] W. Beasley, M. A. Uman and P. L. Rustan, "Electric Fields Processing Cloud-to-Ground Lightning Flashes", J. Geophys. Res., Vol.87, No.C7, pp. 4883-4902, 1982.
 [2] C. D. Weidman, E. P. Krider, "The Fine Structure of Lightning Return Stroke Waveforms", J. Geophys. Res., Vol.83, No.C12, pp. 6239-6247, 1978.
 [3] J. C. Willett and E. P. Krider, "Rise Times of Impulsive High-Current Processes in Cloud-to-Ground Lightning", IEEE Trans. on AP Vol.48, No.9, pp. 1442-1451, 2000.
 [4] 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.
 [5] U. Sonnadara, V. Cooray and M. Fernando, "Lightning radiation field spectra of cloud flashes", Proc. of 27th International Conference on Lightning Protection, Vol. 1, pp.85-90, 2004.
 [6] Bok-Hee Lee, Seung-Chil Lee, Chang-Hwan Ahn and Tatsuo 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.
 [7] 이복희, 길형준, 조성철, 심응보, 우정욱, "운방전에 의해 발생하는 자장의 계측과 통계적 분석", 전기학회 논문지, Vol. 54C, No.6, pp.262-267, 2005.
 [8] 이복희, 이동문, 조성철, "운방전에 의해서 방사된 자계

파형의 특징과 통계", 조명·전기설비학회 논문지, Vol.19, No.6, pp.1-8, 2005.
 [9] N. Kitagawa and M. Brook, "A Comparison of Intracloud and Cloud-to-Ground Lightning Discharges", J. Geophys. Res., Vol.65, pp. 1189-1201, 1960.
 [10] T. Ushio, J. H. Lee, D. Wang, Z. Kawasaki, K. Matuua and T. Matsui, "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.
 [11] C. D. Wiedman and E. P. Krider, "The Radiation Field Waveforms Produced by Intracloud Lightning Discharge Processes", J. Geophys. 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. Geophys. Res., Vol.80, No.27, pp. 3801-3804, 1975.
 [13] 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.

◆ 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.
 Tel : (032)860-7398
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : bhlee@inha.ac.kr

이우철 (李雨澈)

1978년 6월 12일생. 2004년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : (032)860-7398
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : wclee97@naver.com