

낙뢰의 3차원 관측 위한 AOA 방식 낙뢰감지기 설계에 관한 연구

論 文
55C-11-4

A Study on the Design for Lightning Detection System of AOA methods for 3D Lightning Detection

禹 貞 旭[†] · 郭 周 植^{*} · 文 在 德^{**} · 河 崎 善 一 郎^{***}
(J. W. Woo · J. S. Kwak · J. D. Moon · Zenichiro Kawasaki)

Abstract - Since 1996, KEPCO has been operating a wide range lightning detection system, LPATS, and been accumulating relative application techniques and statistical analysis skills. So, KEPRI already has its own basis to develop more accurate advanced detection technology and references to do comparative study. For three-dimensional imaging of lightning channels, UHF/VHF antenna systems were installed at 2 sites. The distance between two sites is about 30 km. These systems were used the AOA(Angle of Arrival) methods for lightning detection. In this paper, we would like to introduce about our system and its results.

Key Words : lightning, real time, LPATS, TOA, AOA, UHF/VHF antenna

1. 서 론

낙뢰 발생의 현황 파악이 전력사업 뿐만 아니라 정보 통신사업 등 모든 사업 분야에 걸쳐 중요한 자료로 인식되고 있는 시점에서, 전력연구원에서는 10여 년간 여러 가지 방식의 낙뢰관측 및 분석을 실시해 왔다. 현재까지는 뇌격전류의 크기나 위치정보 등에 대한 데이터는 낙뢰위치표정시스템(LPATS : Lightning Positioning & Tracking System)이나 신규로 설치된 한전 낙뢰감지 네트워크(KNDNet : Kepco Lightning Detection & Information Network) 등을 통하여 전체적인 경향은 파악할 수 있었으나 낙뢰 진전과정에 대한 상세한 정보를 얻기는 부족한 실정이다. 따라서 낙뢰의 정밀한 데이터 취득방식에 대한 시스템을 개발하여 현재까지의 시스템을 통하여 얻어지지 못하고 있던 낙뢰 진전과정에 대한 상세한 정보를 얻고자 하였다.

낙뢰가 진전되는 정밀정보를 취득하기 위한 시스템으로, 평판 안테나를 이용한 도달각(AOA : Angle of Arrival) 방법의 시스템을 구현하였다[1][2]. 도달각에 의한 측위방법은 낙뢰의 진전과정에 방사된 전자기 펄스(Electromagnetic Pulse)를 평판 안테나에 의해 수신하고, 각 수신된 신호의 도달각을 측정하여 신호원을 기준으로 안테나로 오는 신호의 방향을 찾아내어 위치를 결정하는 측위 방식이다. 또한 지형적 영향과 주변 전자기적 환경을 고려하여 시스템 설치에 적합한 후보지를 선정하기 위하여, 먼저 낙뢰위치표정시

스템 데이터에 의해 낙뢰발생 빈도가 비교적 높은 위치를 중심으로 사이트 서베이를 실시하여 최종 관측지점으로 선정하였다. 본 논문에서는 관측지점 선정결과와 시스템의 원리에 대해 설명하고, 본 시스템으로부터 얻어진 낙뢰데이터에 대해 설명하였다.

2. 관측지점 선정을 위한 사전조사

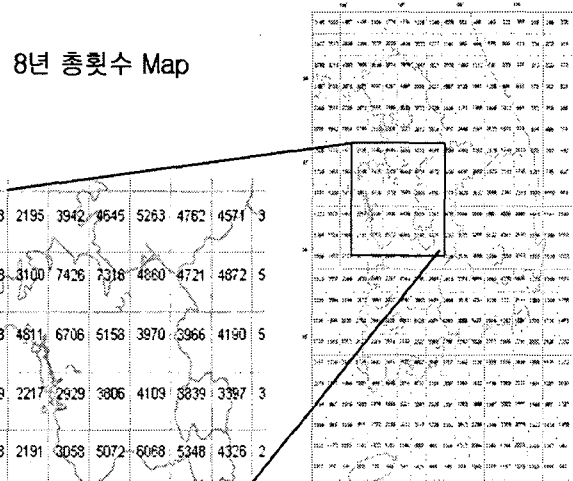


그림 1 낙뢰위치표정시스템에 의한 후보지 선정 자료
Fig. 1 Site Survey Data by LPATS

관측지점 확보 및 필터 설계를 위하여 사이트 서베이를 실시하였다. 사이트 서베이 수행 시에 기본적으로 고려한 사항은 크게 지형적인 영향과 전자기적인 주변 환경이다. 지형적으로는 낙뢰의 진전과정에 방사되는 전자기 펄스를 효과적으로 안테나에서 감지하기 위하여 주변건물에 의해 생기는 윈도우 효과를 배제할 수 있는 탁 트인 환경이 되는 조건에서 5층 이상의 건물로 고려되었다.

† 교신저자, 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院
E-mail : jwwoo@kepri.re.kr
* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院
** 正 會 員 : 慶 北 大 學 校 電 子 電 氣 컴 퓨터 學 部
*** 非 會 員 : 日 本 大 阪 大 學 電 氣 電 子 情 報 工 學 專 攻
接受日字 : 2006年 8月 8日
最終完了 : 2006年 9月 20日

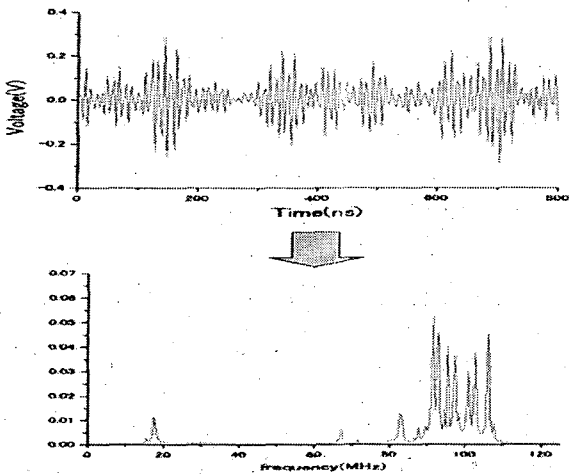


그림 2 노이즈측정 및 필터결과 (관측지점 A)
Fig. 2 Detected Noise and Filtered Waveform (Site A)

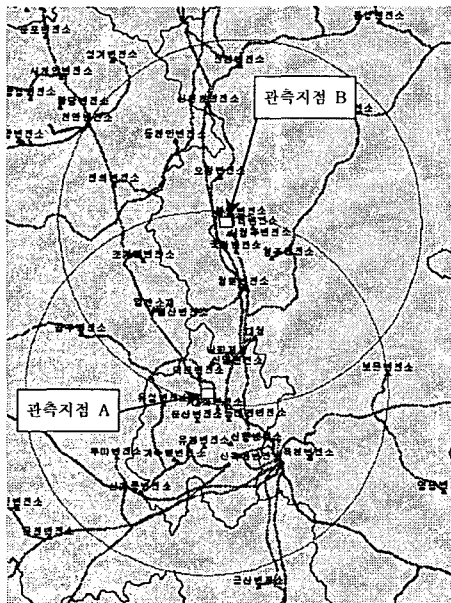


그림 3 시스템 측정 범위
Fig. 3 System Detection Range

전자기적으로는 설계된 안테나의 주파수 범위(25~125 MHz)내에서의 상시 노이즈 파형을 측정했으며, 측정된 노이즈의 필터링 가능성을 검토하였다. 또한 서로 다른 두 위치에서의 데이터 동기를 위해 해당 위치의 통신설비 상태도 검토하였다. 무엇보다도 충분한 낙뢰데이터의 확보를 위하여 낙뢰위치표정시스템의 과거 데이터에 의해 낙뢰발생 빈도가 비교적 높은 위치를 중심으로 최종 관측지점을 선정하였다. 위와 같은 조건들을 기준으로 10여 곳의 사이트 후보지 조사를 실시하여 최종적으로 전력연구원(관측지점 A)과 청주 사직변전소(관측지점 B)를 관측지점으로 선택하였다.

그림 2는 최종 관측후보지로 선택된 관측지점 A에서의 사이트 서베이 결과이다. 해당사이트에서 상시 발생하고 있는 노이즈를 적용될 시스템의 안테나와 디지털 오실로스코

프를 이용하여 관측하였다. 그림에서 상단은 상시적 또는 간헐적으로 발생하는 노이즈 파형을 보여주고 있으며, 이들을 푸리에 변환(FFT : Fast Fourier Transform)한 것이 아래 그림이다. 그림에서 보듯이 안테나에서 사용하는 주파수대역(25~125 MHz)내에서는 100 MHz 주변의 라디오 주파수 영역에서 상시 노이즈가 있었다. 해당 노이즈는 평판 안테나 내에 다음에서 설명될 필터에 의해 제거 되어진다.

한 시스템의 측정범위는 약 30 km 정도이며, 낙뢰진전 과정을 관측하여 낙뢰의 방전경로와 이동정보를 3차원으로 표현하기 위하여, 서로 다른 두 시스템에서 동시에 동일 낙뢰 정보를 관측 가능하도록 그림 3과 같이 낙뢰 측정범위가 겹치도록 위치를 선정하였다.

3. 시스템의 구성과 특성

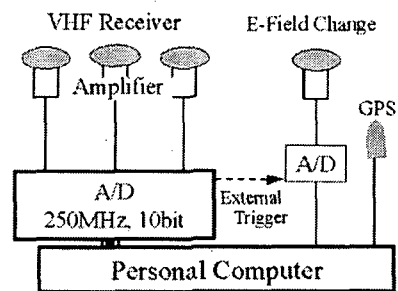


그림 4 시스템 구성도
Fig. 4 System Configuration

관측 지점별로 하나의 시스템이 설치되었으며, 하나의 시스템은 그림 4처럼 3개의 평판 안테나, 250 MHz 샘플링의 10 bit A/D 변환기와 별도의 전계변화를 감지하는 전계 센서로 구성된다[3]. 디지털로 변환된 펄스 신호는 분석용 컴퓨터에서 처리되어지며, 이때의 신호는 GPS 데이터와 연동 되어진다. 또한, 신호처리 서버까지의 데이터 통신선은 세계의 안테나에서 신호전달시간차를 최소화하기 위하여 길이를 일정하게 설치하였다.

표 1 안테나 특성

Table 1 Antenna Characteristics

Band Width	25~125 MHz
Sampling Frequency	250 MHz
Resolution	10 bit
Record Length	2 μsec × 2000 segments (MAX)
Time interval between pulses	1 μsec
Noise Filter	Noise filtering ability about the expected noises

세 개의 평판 안테나는 직경이 30 cm이며, 동일한 베이스 라인(d=10m)으로 직삼각형 형태로 배치되어 있다. 각 안테나는 내부에 기본적으로 고역 필터(>25 MHz)를 내장하고 있으며, 그림 2에서의 100 MHz 주변의 상시 노이즈를 제거하기 위하여 그림 5와 같은 특성을 가진 저역 필터를 추가로 설계하여 설치하였다. 최초 설계 시에는 125 MHz 이하

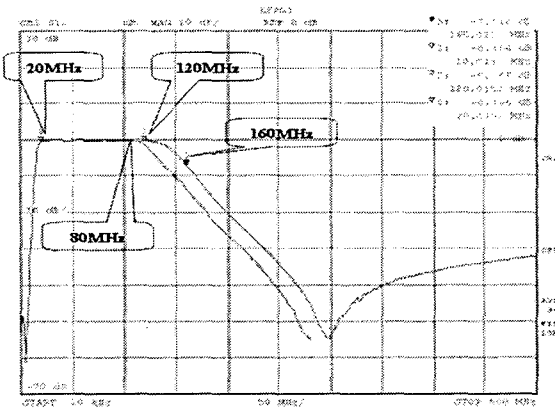


그림 5 사용된 필터 특성 (관측지점 A)
Fig. 5 Used Filter Characteristic (Site A)

의 신호는 통과되도록 설계하였으나, 측정된 노이즈 제거를 위하여 80 MHz 이하로 신호를 제한하였다. 필터에서 통과된 신호는 증폭기에 의해서 증폭된 신호로 동축 케이블에 의해 A/D 변환기로 연결되어 있다. 낙뢰에 의해 방사된 신호(dE/dt)는 250 MHz 샘플링속도로 디지털화 되어진다. A/D 변환기는 10bit 해상도로, IEEE-488 인터페이스를 통해 컴퓨터에 의해 제어된다. 디지털링 속도가 높기 때문에 낙뢰로부터 생긴 신호를 연속적으로 모두 다 저장하는 것은 불가능하여 각 전자파를 순차적으로 트리거하는 기법을 채용했다[4]. 디지털라이저의 전체 메모리를 세그먼트(segment)들로 나누었으며, 각 세그먼트는 각기 한 개의 광대역 전자파를 저장할 수 있다. 낙뢰에 의해 발생되어 감지기에 관측된 전자파의 크기가 임계 레벨(threshold level)을 넘어서면, 트리거 신호가 동작되어 파형이 저장되어진다.

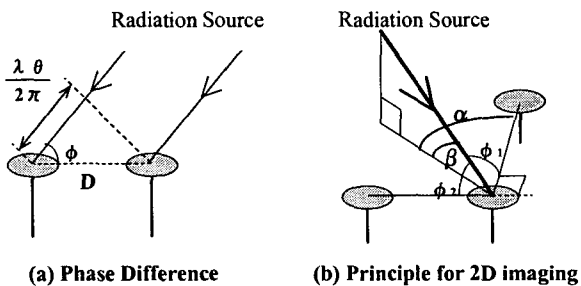


그림 6 낙뢰의 2차원 관측을 위한 삼각 배열된 감지기
Fig. 6 Antenna Arrangement for 2D Imaging of Lightning

한 시스템에서는 낙뢰에 의해 발생된 파형이 각 감지기에 도달하는 위상차를 계산함으로써 기본적으로 2차원 형태의 낙뢰진전과정을 관측할 수 있다. 뇌방전시 특히 뇌운과 대지사이의 낙뢰가 발생할 때에는 매우 큰 전계변화가 일어나는데 이를 트리거 신호로 하여 연속적으로 발생하는 펄스신호들을 수평 배열된 3개의 감지기가 측정하고, 얻어진 각 신호들을 푸리에 변환(FFT)을 통하여 감지기간의 결과치들을 비교하고, 측정범위내의 모든 주파수성분들의 위상차를 계산하여 뇌방전원의 방위각과 고도각을 계산하는 방식이다[5].

$$\theta = \frac{2\pi f D \cos \Phi}{c}, \quad \Phi = \cos^{-1} \frac{c\theta}{2\pi f d} \quad (1)$$

그림 6(a)에서와 같이 무한히 먼 곳에서 발생한 신호가 평면으로 배치된 두개의 감지기에 나란하게 입사하였을 경우 식 (1)과 (2)에 의해 입사각 θ 를 구할 수 있다. 이때 c 는 빛의 속도($\sim 3 \times 10^8$ m/s)이다. 이와 같은 원리에 의하면 그림 6(b)와 같이 세 개의 감지기에 의해 서로 다른 두개의 감지기 조합이 가능하고, 각각의 Φ_1, Φ_2 가 계산된다.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\cos \Phi_2}{\cos \Phi_1} \quad (2)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\cos \Phi_1}{\cos \alpha} \quad (3)$$

각 베이스라인을 기준으로 Φ_1, Φ_2 가 계산되면, 그림 6(b)에서와 같이 한 기준선을 중심으로 방위각 α 를 식 (2)에 의해 계산할 수 있다. 역시 Φ_1, α 를 통하여 식 (3)과 같이 고도각 β 를 구하고, α 와 β 를 조합하면 2차원 낙뢰정보를 얻을 수 있다[5].

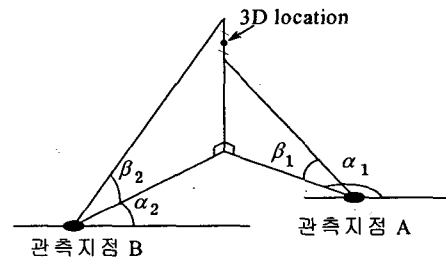


그림 7 낙뢰 3차원 측정 원리
Fig. 7 Principle of 3D Lightning Detection

낙뢰가 진전되는 과정을 관측하여 3차원적으로 표현하기 위하여 그림 7처럼 관측지점 2개소에 2차원 측정이 가능한 시스템(각 세 개의 안테나로 구성된 시스템)을 각각 설치하였다. 측정지점을 관측 유효범위(30 km) 이내에 위치시켜 동일한 낙뢰 신호원에 대하여 방위각 α_1, α_2 와 고도각 β_1, β_2 를 계산하여 일정 낙뢰에 3차원 위치정보를 얻을 수 있게 설계하였다.

$$x = \frac{a_1 X_1 - a_2 X_2 - Y_1 + Y_2}{a_1 - a_2} \quad (4)$$

$$y = a_1 (x - X_1) + Y_1 \quad (5)$$

여기서, $a_1 = \tan(\frac{\pi}{2} - \alpha_1)$, $a_2 = \tan(\frac{\pi}{2} - \alpha_2)$

α_1 과 α_2 를 이용하여 발생낙뢰의 위치에 대한 평면 정보(x, y)를 식 (4), (5)에 의해 구한다[6].

$$z_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2} \tan \beta_1 \quad (6)$$

$$z_2 = \sqrt{(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2} \tan \beta_2 \quad (7)$$

$$z = \frac{z_1 + z_2}{2} \quad (8)$$

또한 각각의 고도각 β_1, β_2 를 이용하여 식 (6), (7)에 의해 z_1, z_2 를 구한다[2]. 이론상으로는 z_1 과 z_2 는 동일한 값을 가져야 하지만, 여러 가지 조건들에 의해 그림 7과 같이 어느 정도의 오차를 가지게 된다. 따라서, 최종 위치 z 는 z_1, z_2 의 평균값으로 구하였다[6].

4. 낙뢰데이터의 관측결과

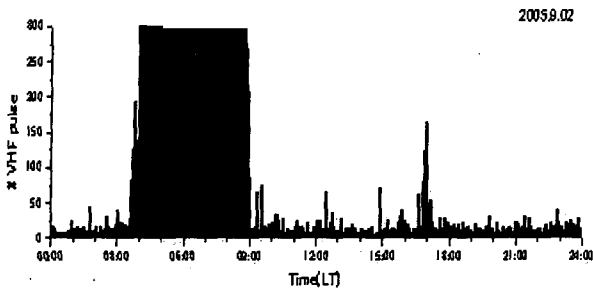


그림 8 2005.9.2일자 시간대별 관측데이터 (관측지점 A)
Fig. 8 Detection Data /2005.9.2, Time base (Site A)

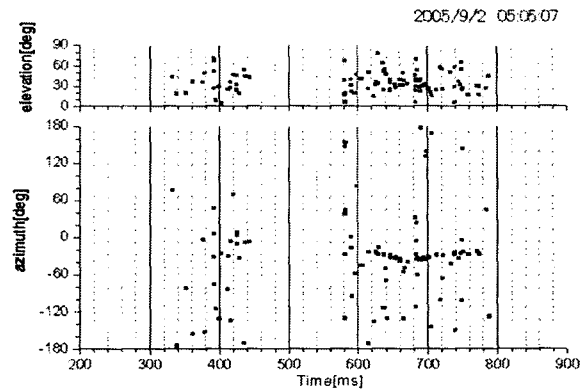


그림 10 2005.9.2 05:05:07 관측데이터 (관측지점 A)
Fig. 10 2005.9.2 05:05:07 Detection Data (Site A)

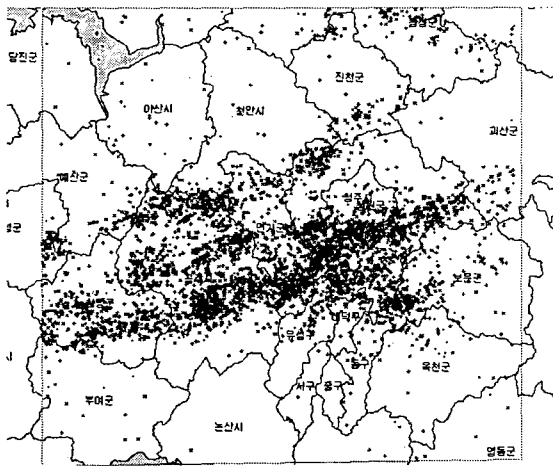
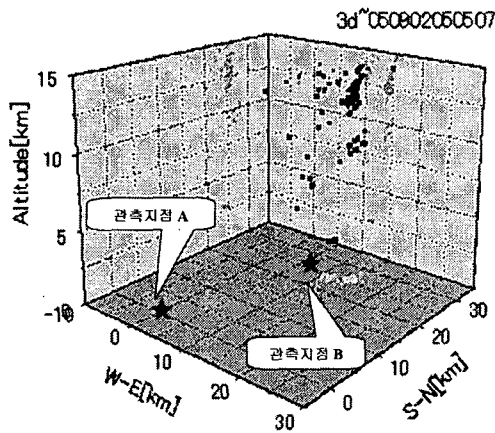


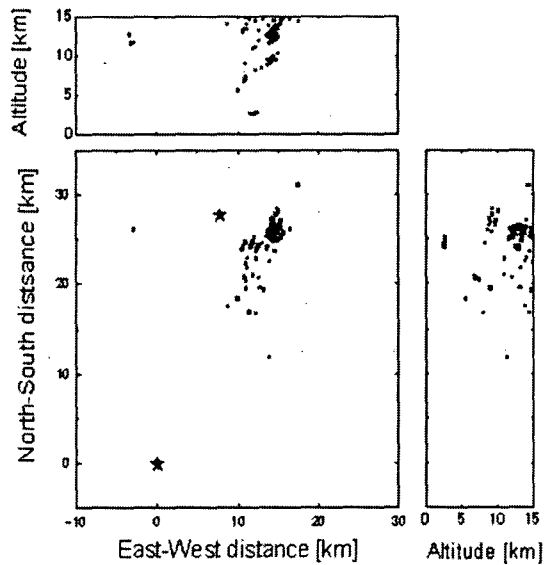
그림 9 2005.9.2일자 시간대별 관측데이터 (KLDNet)
Fig. 9 Detection Data /2005.9.2, Time base (KLDNet)

그림 8은 관측지점 A에서 낙뢰측정시스템이 2005년 9월 2일 측정된 낙뢰방전신호의 히스토그램을 보여주고 있다. 그래프의 X축은 시간을 나타내고 Y축은 측정시스템이 감지한 펄스수를 나타낸다. 동일한 시간대 동일한 지역에서 낙뢰감지 네트워크(KLDNet)에서 관측된 정보가 그림 9에 나타나 있다[7]. 그림 8과 그림 9에 표시된 정보의 원시데이터로부터 오전 4시부터 9시까지 많은 낙뢰가 있었음을 양쪽 시스템을 통해서 확인할 수 있었다.

그림 10은 그림 8에서 얻어진 데이터 중에서 05시 05분의 특정시간 범위내 데이터를 관측지점 A에서를 기준으로 분석한 2차원 낙뢰정보를 보여준다. 그래프는 X축에 발생시간을, Y축에 낙뢰방전 신호원의 고도각과 방위각을 각도(degree)로 나타내주고 있다. 이러한 정보는 실제로 전국을 감지영역으로 하는 낙뢰위치표정시스템이나 한전낙뢰감지네트워크의 데이터와 위치나 발생시간 비교 등은 가능하나, 3차원 진전 과정은 이해할 수 없다. 따라서 동일시간대에



(a) 3차원으로 표현된 결과



(b) 낙뢰관측지점 기준 낙뢰발생현황

그림 11 3차원으로 표현된 관측데이터 (2005.9.2 05:05:07)
Fig. 11 3D Display Results (2005.9.2 05:05:07)

관측지점 B에서의 데이터와의 비교 및 데이터 조합을 통하여 3차원(z, y, z) 형태의 표현을 시도하였다.

그림 11은 두 관측지점에서 얻어진 2차원 정보를 이용하여 최종적으로 3차원 정보를 얻어낸 결과이다. 그림에서 x, y 축은 상대거리를 나타내고 있으며, 두 붉은색의 점은 두 관측지점 A, B의 위치를 의미한다. 표시된 그림에서 보듯이 해당 낙뢰는 관측지점 B 인근에서 발생되었으며, 이 각각의 점들을 시간 차이를 두고 표시하면 3차원적으로 낙뢰가 진행되는 과정을 구별할 수 있다. 또한 이러한 시뮬레이션 결과에 의해 해당 낙뢰가 단일 낙뢰가 아니라 3~4개의 섬락을 포함한 다중 낙뢰임을 확인할 수 있었다. 또한 그림 11(b)에서 발생낙뢰의 직경이 약 10 km 정도이며, 낙뢰발생 시작점이 고도 약 15 km 정도이었음을 알 수 있었다.

5. 결 론

현재까지 운용중인 낙뢰위치표정시스템(LPATS)나 낙뢰감지네트워크(KLDNet)와 같은 넓은 영역의 낙뢰관측시스템에서 얻어질 수 있는 정보 외에, 낙뢰의 발생 전진과정을 3차원적으로 관측하기 위한 시스템을 설계하고 제작, 설치하였다.

본 논문에서는 설계된 시스템의 사양과 관측 원리, 측정사이트 선정을 위한 사이트 서베이 결과 등에 대해 기술하였고, 2차원 데이터로부터 3차원데이터를 추출하기 위한 알고리즘을 설명하였다. 또한 실제 시스템에서 얻어진 2차원 관측데이터로부터 얻어진 3차원 관측결과를 설명하였다.

현재까지 설명된 3차원 정보는 실시간 3차원 표현이 불가능하지만, 향후 본 연구내용 중에서 이러한 3차원 정보를 GPS 시각 동기장치와 통신 모듈을 추가하여 실시간으로 데이터를 양쪽 사이트에서 수집하여 비교하는 알고리즘을 개발하고, 실시간으로 분석하여 3차원적으로 표현하면서 다른 시스템과의 데이터 비교가 가능한 프로그램을 개발하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 河崎善一郎, “雷放電路可視化のための廣帯域干渉計”, 生産と技術, Vol.53. No.4, pp35-37, 2001
- [2] Dr. Zen-IChiro Kawasaki, “Comparison between Broad band and Narrow band Interferometer for Lightning Observation”, JIEE, 119-7, 807-811
- [3] Takeshi Morimoto, “Thunderstorm Observation by the Operational VHF Broadband Digital Interferometer”, Osaka University, 2005
- [4] Dr. Zen-IChiro Kawasaki, “Broadband Radio Interferometer Utilizing a Sequential Triggering Technique for Locating Fast-Moving Electromagnetic Sources Emitted from Lightning”, IEEE Trans on Instrumentation and measurement, Vol.49, No.2, April 2000
- [5] Dr. Zen-IChiro Kawasaki, “Dependency of VHF broadband Lightning source mapping on Fourier

spectra”, Geophysical Research Letters, Vol.27, No.18, 2917-2920, Sep. 2000

- [6] Dr. Zen-IChiro Kawasaki, “3D imaging of lightning channel and leader progression velocity”, JIEE, Vol.120-B, No.6. 2000
- [7] 우정욱 외, “UHF/VHF 안테나를 이용한 근거리 낙뢰에 대한 정밀정보 취득 기법에 관한 연구(중간보고서)”; 전력연구원, 2005

저 자 소 개



우 정 욱(禹 貞 旭)

1968년 9월 19일 생. 1992년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5864
E-mail : jwoo@kepri.re.kr



곽 주 식(郭 周 植)

1972년 01월 10일 생. 1994년 충북대학교 공대 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5868
E-mail : kwakjs@kepri.re.kr



문 재 덕(文 在 德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대 사대 물리교육과 졸업. 1975년 경북대 대학원 전자공학과 졸업(공석). 1982년 동경대 전기공학과 졸업(공박). 1983년~현재 경북대 전자전기컴퓨터공학부 교수
Tel : 053-950-5601
E-mail : jdmoon@knu.ac.kr



河崎善一郎

1949년 1월 17일생. 1973년 大阪大學 工學部通信工學科 졸업. 1975년 大阪大學 大學院 工學研究科 通信工學專 攻修士課程 졸업. 1978년 大阪大學 大學院 工學研究科 通信工學專攻 博士課程 졸업(工學博士). 현재 日本 大阪大學 電氣電子情報工學專攻 교수
Tel : 06-6879-7690
E-mail : zen@comm.osaka-u.ac.jp