

Development of a Detect-and-Acquisition System for Broadband Lightning Signals

宋承憲* · 金棟赫** · 李誠浩* · 禹貞旭*** · 成泰慶†

(Seung-Hun Song · Dong-Hyoc Kim · Sung-Ho Lee · Jung-Wook Woo · Tae-Kyung Sung)

Abstract - To implement a high-precision lightning tracking system utilizing TDOA measurements, high-speed data acquisition and precise timing synchronization between ground sensors should be achieved. At the same time, considering the size of digitizer's memory, the data memory needs to be managed so that only the sampled data around the occurrence of stepped leader pulse is stored. This paper presents a detection-and-acquisition system for lightning signals that is the main equipment of ground sensor in lightning tracking system. GPS clock module is used to get precise timing synchronization and the 500MHz high speed digitizer is employed. In order to detect the leading edge of the lightning pulse and save the sampled data and its timing, lightning detection module is implemented and multi-record method is employed in the proposed system. Field experiment results show that the proposed system can detect and save the lightning signal efficiently.

Key Words : Lightning Detection, Stepped Leader, TDOA Positioning

1. 서 론

낙뢰 추적 시스템은 낙뢰의 발생 위치 및 시각, 진행경로 등을 측정하여 낙뢰의 분포, 발생 빈도, 궤적 등을 분석하는 장치로서, 안정적인 전력계통의 운영과 낙뢰에 강인한 송전/변전 설비의 설계 등에 활용하고 있다. 낙뢰 추적 시스템은 전국을 걸쳐 일정 간격으로 센서를 설치하고 낙뢰 발생 시각과 위치를 탐지한 후 이것을 기록, 표시하여 해당 지역의 대지 뇌격 밀도를 계산한다. 이러한 자료들은 그 지역의 건물이나 전기설비의 낙뢰빈도를 추정하는데 사용할 수 있다.

현재 국내에서 실용화되어 있는 낙뢰 추적 시스템으로는 한국전력거래소에서 운용중인 LPATS (Lightning Position And Tracking System)와 기상청에서 운용하고 있는 IMPACT ESP (IPMroved Accuracy from Combined Technology Enhanced Sensitivity and Performance) 센서 및 LDAR II (Lightning Detection And Ranging) 센서가 있다[1]. LPATS는 VLF~MF 대역의 2~500KHz의 신호를 수신하며, TOA (Time Of Arrival)방식을 이용한다. TOA 방

식은 낙뢰의 전자파가 4개 이상의 지상 수신국(monitring station)에 도달하는 시각을 측정하여 거리 정보를 얻은 후 이를 이용하여 3차원 낙뢰위치를 구하며, 이러한 TOA 방식으로 위치를 구하기 위해서는 수신국간의 정확한 시각 동기(timing synchronization)가 필요하다[2]. IMPACT ESP 센서는 VLF~LF 대역의 5~15KHz의 신호를 수신하며, 낙뢰 방전의 자계 방향을 측정하는 MDF (Magnetic Direction Finding) 방식과 TOA 방식을 결합하여 사용한다. LDAR II 센서는 VHF 대역의 45~200MHz의 신호를 수신하며, TOA 방식을 이용한다. 현재 사용되고 있는 이러한 시스템들은 대부분 수백 미터의 위치 정확도를 갖는다.

일본의 오사카 대학에서 개발한 광대역 전파 간섭계(broadband radio interferometer)는 수신국의 열 안테나(array antenna)를 이용하여 낙뢰신호의 도래각(incident angle)을 측정하고 이를 이용하여 낙뢰의 위치를 구하는 AOA (Angle Of Arrival) 방식의 시스템이다[3]. 이 시스템은 30km 내외의 비교적 짧은 측정반경을 갖지만 초고속 디지털화(digitizer)를 사용함으로써 수~수십 미터의 위치 정확도를 갖는다. 또한 낙뢰 위치뿐만 아니라 낙뢰의 진행 궤적까지도 구할 수 있고 각도를 이용하여 위치를 계산하기 때문에 수신국 간에 정확한 시각 동기가 필요하지 않다는 장점이 있다. 하지만 수신국에 열 안테나를 정확하게 설치해야 하고 위상 모호성(phase ambiguity) 문제를 해결해야 한다는 단점이 있다.

수~수십 미터의 정확도를 갖는 고정밀 낙뢰 추적 시스템은 TOA 혹은 TDOA (time difference of arrival) 방식으로

† 교신저자, 正 會 員 : 忠南大 工大 情報通信工學科 教授
E-mail : tksaint@cnu.ac.kr
* 學生會員 : 忠南大 工大 情報通信工學科 碩士課程
** 學生會員 : 忠南大 工大 情報通信工學科 博士課程
*** 正 會 員 : 韓國 電力研究員 研究員
接受日字 : 2007年 4月 16日
最終完了 : 2007年 6月 4日

도 구현할 수 있다. TDOA 방식은 낙뢰신호가 두 개의 수신국에 도달하는 시간차를 측정하여 쌍곡선 방정식을 얻고, 쌍곡선들의 교점을 구하여 위치를 구한다[4]. TDOA 방식은 TOA 방식과 마찬가지로 수신국간의 정확한 시각 동기가 필요하지만 열 안테나가 필요하지 않고 수신기의 시각 바이어스(clock bias)를 제거할 수 있기 때문에 수신국 구조가 간단하다는 장점이 있다. 고정밀 낙뢰 추적 시스템을 TDOA 방식으로 구현하기 위해서는 수신국간의 시각 동기가 수 ns 이내로 정확하게 이루어 져야 한다. 즉 거리오차를 3m 이내로 하고자 할 경우 동기오차는 10ns 이내가 되어야 한다. 또한 측정 거리의 분해능(resolution)을 높이기 위하여 초고속 디지털타이저를 사용하여야 한다. 예를 들어 500MHz의 디지털타이저를 사용하는 경우 샘플링 주기가 2ns이기 때문에 측정거리의 분해능이 60cm가 된다. 이와 같이 초고속 디지털타이저를 사용하는 경우 데이터를 저장하는 메모리 용량의 한계로 인하여 메모리의 효율적인 관리가 필요하며, 낙뢰 펄스들이 발생하는 시점들을 탐지하여 필요한 부분의 데이터와 발생시각을 저장할 수 있는 신호처리 기법의 구현이 필요하다.

본 논문에서는 TDOA 방식의 낙뢰 추적 시스템을 위한 낙뢰 탐지 및 획득 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템은 낙뢰를 탐지하는 부분과 낙뢰신호를 효율적으로 저장하는 부분으로 구성되며, 세그먼트별로 시각정보를 첨부하여 낙뢰신호를 저장하는 멀티 레코드 기법을 이용하였다. 제안한 시스템을 수신국 장비로 이용하여 TDOA 방식의 낙뢰 추적 시스템을 구성하는 경우 수~수십 미터 이내의 3차원 위치 정확도를 가질 수 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 먼저 낙뢰의 메커니즘과 TDOA 방식을 사용한 낙뢰 추적 시스템의 구성에 대하여 설명한다. 그 후에 고정밀 낙뢰 추적 시스템을 위한 낙뢰 탐지 및 획득 시스템의 구성요소 및 동작 메커니즘에 대하여 설명한다. 3장에서는 실제 실험을 통하여 낙뢰 탐지 및 획득 시스템의 실험 결과 및 성능을 확인한다.

2. 광대역 낙뢰신호 탐지 및 획득 시스템

2.1 낙뢰 메커니즘

대부분 경우의 운-대지간 낙뢰방전(cloud-to-ground lightning discharge)은 뇌운 안의 선행 방전(preliminary breakdown)으로부터 시작된다. 이에 기인하여 약 수ms에서 수십ms 후에 스텝 리더(stepped leader)가 약 20μs~100μs (평균 60μs) 간격마다 발생하면서 대지를 향하여 전하가 이동하는 경로를 만들게 된다. 스텝 리더가 약 5ms~50ms(평균 20ms)동안 진행되어 마침내 대지로부터 수십 미터까지 도달하게 되면 대지와 스텝 리더의 높은 전위차로 인하여 땅으로부터 전하가 올라오게 되는 리턴 스트로크(return stroke)가 발생한다. 리턴 스트로크는 스텝 리더가 만든 경

로를 통해 뇌운을 향해 올라가며, 수십 ms 후에 다트 리더(dart leader)가 다시 대지로 향하여 발생한다. 그리고 수 ms후에 두 번째 리턴 스트로크가 발생하며, 이와 같은 다트 리더와 리턴 스트로크는 그림 1에서 보는 바와 같이 수차례 반복된다[5][6].

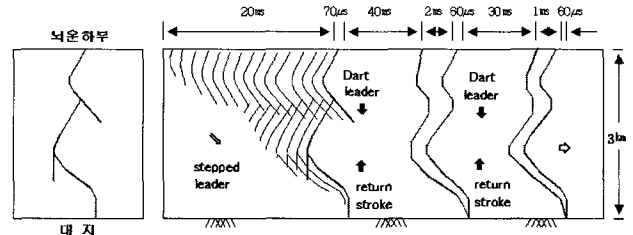


그림 1 낙뢰 진행과정
Fig. 1 Processing of lightning

그림 2는 하나의 스텝 리더 낙뢰 펄스의 전형적인 파형을 나타낸 것이다. 스텝 리더 펄스는 평균 60μs의 간격으로 약 1μs 동안 발생하며, 평균 $2.5 \times 10^5 m/s$ 의 속도로 대지를 향하여 진행한다. 이와 같은 낙뢰펄스가 반복적으로 발생하는 스텝 리더 펄스열(pulse train)을 이용하면 낙뢰의 3차원 위치 뿐만 아니라 낙뢰 궤적도 계산할 수 있다.

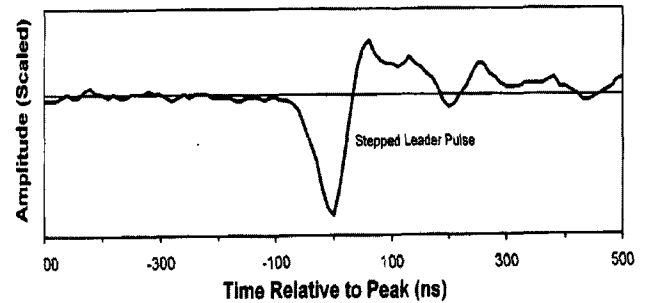


그림 2 낙뢰 펄스의 파형
Fig. 2 Waveform of lightning pulse

2.2 낙뢰 추적 시스템

TDOA 방식을 이용한 낙뢰 추적 시스템을 구성하기 위해서는 4개 이상의 수신국에서 낙뢰 펄스열 신호의 탐지 시각을 구하여야 하며, 이때 수신국 간의 시각 동기가 정확하게 이루어져야 한다. 그림 3은 TDOA 방식의 낙뢰 추적 시스템의 구성을 보인 것이다. 수신국은 낙뢰 검출장치, 낙뢰신호 저장장치, 그리고 시각정보 기록장치로 구성되며, 각각의 수신국에서 측정된 낙뢰 펄스열 신호 탐지시각 및 신호형상을 서버로 전송한다. 서버에서는 기준 수신국(reference monitoring station)에서의 탐지 시각과 다른 수신국에서의 탐지시각을 차분(differencing)하여 다음과 같은 TDOA 측정

치를 얻는다.

$$r_{i,1} = c(t_i - t_1) \tag{1}$$

$$= \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2}} + v_i - v_1$$

식에서 c 는 광속(speed of light), t_i 는 i -번째 수신국에서의 탐지시각, (x, y, z) 는 낙뢰 펄스의 발생 위치, (x_i, y_i, z_i) 는 수신국 위치, 그리고 v_i 는 측정잡음을 나타내며, 첫 번째 수신국을 기준 수신국으로 가정하였다. TDOA 측정식에서 미지수는 낙뢰 펄스의 발생위치 (x, y, z) 이므로 4개 이상의 TDOA 측정치를 얻으면 낙뢰의 3차원 발생위치 및 진행 궤적을 구할 수 있다.

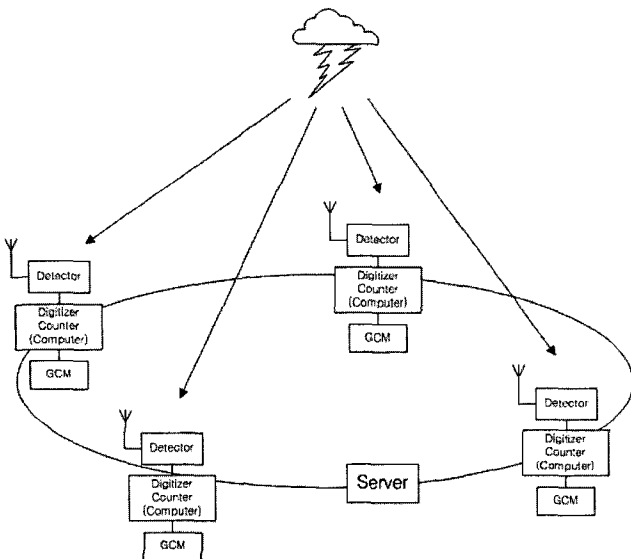


그림 3 TDOA 방식의 낙뢰추적시스템 구성도
Fig. 3 Configuration of a lightning tracking system using TDOA measurements

2.3 낙뢰신호 탐지 및 획득 시스템

고정밀 위치 정확도를 갖는 TDOA 방식의 낙뢰추적 시스템을 구현하기 위해서는 수신국간에 정확하게 시각 동기화 이루어져야 하고 초고속으로 낙뢰신호를 샘플링 해야 하며, 이를 위하여 다음과 같은 사항들을 고려해야 한다.

- 낙뢰 펄스신호가 왜곡되지 않도록 하기 위하여 광대역 안테나를 사용하여야 한다. 본 논문에서 제안한 시스템에서는 20~100MHz의 3dB 대역폭을 갖는 광대역 안테나를 사용하였다.
- 안테나에서 수신한 낙뢰 펄스신호를 빠짐없이 정확히

탐지하기 위하여 오경보율(false alarm rate)을 최소로 하면서 탐지확률(detection probability)을 최대로 할 수 있는 낙뢰 검출 장치가 필요하다.

- 고정밀 낙뢰 추적 시스템을 구현하기 위해서는 초고속 디지털라이저가 필요하며, 제한한 시스템에서는 8bit의 분해능을 가진 500MS/s의 디지털라이저를 사용하였다. 스텝 리더의 진행시간이 최대 50ms라고 할 때 500MS/s의 디지털라이저의 출력 데이터를 저장하기 위해서는 25MByte의 메모리가 필요하며, 이와 같은 대용량 메모리를 갖는 디지털라이저는 매우 고가이다. 한편 스텝 리더 펄스마다 샘플링한 데이터를 컴퓨터로 전송하는 방법은 컴퓨터로 데이터를 전송하고 다음 신호를 샘플링할 준비를 하는데 소요되는 시간이 스텝 리더 펄스의 발생 간격과 비교하여 상대적으로 길기 때문에 데이터를 유실하는 경우가 발생할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 스텝 리더 펄스는 평균 60us마다 평균 1us의 펄스 폭으로 발생하기 때문에 낙뢰 펄스가 발생하는 순간 부근의 데이터만을 저장하면 메모리 용량을 대폭 줄일 수 있다. 따라서 낙뢰 검출 장치를 이용하여 디지털라이저의 메모리를 적절히 관리하면 적은 양의 메모리를 가지고 효율적으로 낙뢰 데이터를 저장할 수 있다.

- TDOA 방식의 낙뢰 추적 시스템을 구현하기 위해서는 수신국 간의 시각동기가 정밀하게 이루어진 상태에서 각 수신국에서 수신한 탐지시각 정보를 정확히 기록해야 한다. 제한한 시스템에서는 GCM (GPS clock module)을 이용하여 정밀 시각 동기화를 구축하였다. GCM은 GPS 수신기와 OCXO (Oven-Controlled crystal Oscillator)로 구성되며, GPS를 이용하여 보정된 1PPS (Pulse Per Second) 신호와 이에 동기된 클럭 신호를 제공한다. 본 논문에서 사용하는 GCM은 10MHz의 클럭을 제공하며, 절대적인 시각 정확도는 20ns 이내이다[7]. 그러나 수신국간의 기저선(baseline) 길이가 수십Km 이내인 경우에는 위성으로부터 각각의 수신국에 도달하는 전파의 진행 경로가 유사하기 때문에 이러한 경우에는 GCM 간의 상대적인 시각오차가 10ns 이내로 감소된다[8].

그림 4는 위의 네 가지 사항을 고려하여 구현한 수신국 장비의 블록도이다. 수신국 장비는 광대역 안테나, 낙뢰 검출기, 디지털라이저, 카운터, GCM, 그리고 컴퓨터로 구성된다. 최초의 스텝 리더 펄스가 광대역 안테나에 입력되면 낙뢰 검출기에서는 낙뢰신호를 검출하여 디지털라이저와 카운터에 알린다. 디지털라이저에서는 이후의 스텝리더 펄스에 대하여 광대역 안테나의 출력을 500MS/s의 속도로 샘플링하여 저장한 후 이를 컴퓨터로 전송한다. 이때 카운터에서도 GCM의 10MHz 신호를 기준으로 낙뢰 검출기에서의 탐지시각을 계산하여 컴퓨터에 전달함으로써 디지털라이저로부터 전달되는 낙뢰 펄스열의 발생 시각을 알려준다. 수신국 장비의 구성요소에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

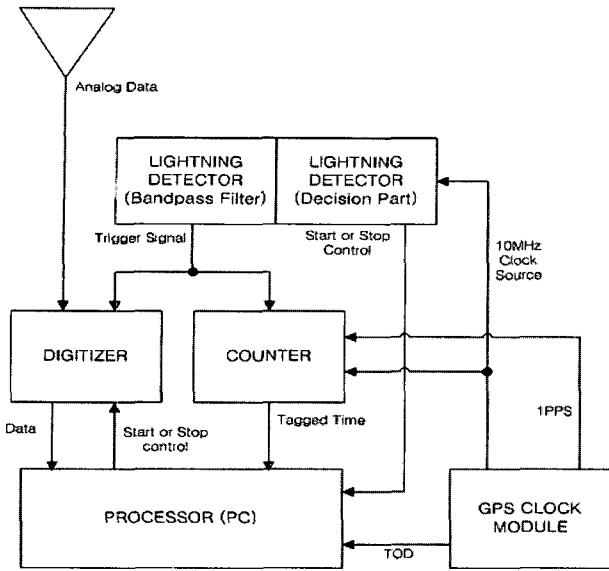


그림 4 수신국 장비의 구성도
Fig. 4 Configuration of an equipment at monitoring station

2.3.1 낙뢰 검출장치

낙뢰 검출기는 그림 5와 같이 필터부, 비교기, 유지회로, 게이트, 그리고 판별부로 구성된다. 필터부는 통과 대역폭이 약 5MHz인 3개의 대역통과필터 (저주파, 중주파, 고주파 대역)로 구성되며, 20~100MHz의 대역을 갖는 안테나 입력신호가 인가되면 각각의 필터에서 3 가지 주파수 성분을 추출한다. 광대역의 낙뢰신호가 인가될 경우에는 3개의 대역통과 필터에서 모두 신호가 출력될 것이다. 한편, 비교기에서는 각각의 필터 출력을 증폭한 신호와 임계값을 비교하여 신호의 유무를 나타내는 '0' 혹은 '1'을 출력한다.

낙뢰가 발생하는 경우에는 3개의 비교기에서 모두 '1'이 출력되어 AND 게이트1의 출력이 '1'이 될 것이다. 그러나 잡음이나 낙뢰 이외의 신호에 의하여 낙뢰가 발생하지 않은 때에도 AND 게이트1의 출력이 '1'이 될 수도 있으며, 본 논문에서 제안한 시스템에서는 스텝 리더 펄스 신호의 성질을

이용하여 오정보율을 감소시키는 방법을 도입하였다. 즉 스텝 리더 펄스 사이의 평균 간격이 60us이라는 성질에 따라 AND 게이트1이 '1'이 되면 유지회로의 출력이 t_H (예를 들어 200us)동안 '1'로 유지하고 그 동안 판별부에서 다음 펄스 신호의 탐지 여부를 관찰하도록 하였다. 유지회로의 출력이 계속 '1'로 유지되도록 연속적으로 n회 (예를 들어 3회) 신호가 검출되면 낙뢰신호로 판별하게 되며, 판별부에서는 낙뢰 발생신호를 출력한다. 이 신호는 디지털이저에 인가되며, 이때부터 디지털이저에서 샘플링을 시작하고 임시 메모리에 샘플링한 데이터를 저장한다.

앞에서 설명한 바와 같이 초고속 디지털이저를 이용하여 낙뢰 신호를 저장할 때에는 데이터 저장의 효율성을 위하여 스텝 리더 펄스 주변의 데이터만을 저장하는 것이 바람직하며, 이때 저장하는 신호의 정확한 발생시각도 함께 저장할 수 있어야 한다. 이러한 요구사항을 만족하기 위하여 그림 5에서 보는 바와 같이 AND 게이트1의 출력과 GCM의 10MHz 신호를 AND 게이트2에 인가하고 그 출력을 디지털이저와 카운터에 인가하도록 하였다. 이와 같이 구성하면 낙뢰 펄스에 의하여 AND 게이트1의 출력이 '1'이 된 후 첫째로 발생하는 클럭 펄스에 의하여 AND 게이트2가 동작되며, 그 결과 디지털이저와 카운터가 GCM의 10MHz 신호에 동기(synchronization)하여 동작하도록 만들 수 있다.

스텝 리더가 대기부근까지 진행하여 리턴 스트로크와 다투 리더가 발생함으로써 하나의 낙뢰가 종료되면 AND 게이트1은 '1'을 출력되지 않게 된다. 이러한 경우 판별부에서는 낙뢰가 종료되었다고 판단하고 컴퓨터에 낙뢰종료신호를 전송하게 되며, 컴퓨터는 디지털이저와 카운터에 저장되어 있는 스텝 리더 펄스열 신호의 샘플링 데이터 및 그에 대한 발생시각을 요청한다.

2.3.2 낙뢰검출시각 기록장치

고정밀의 TDOA 측정치를 얻기 위해서는 각 수신국에서 획득하는 데이터의 시각동기가 정확히 이루어져야 한다. 본 논문에서는 스텝 리더 펄스가 발생하는 순간의 시각정보를 정확히 기록하기 위해 GCM의 1PPS를 기준으로 사용하였다. 그림 6은 각각의 스텝리더 펄스에 대하여 낙뢰 검출기에서 얻은 낙뢰 검출신호별로 시각정보를 기록하는 타이밍을

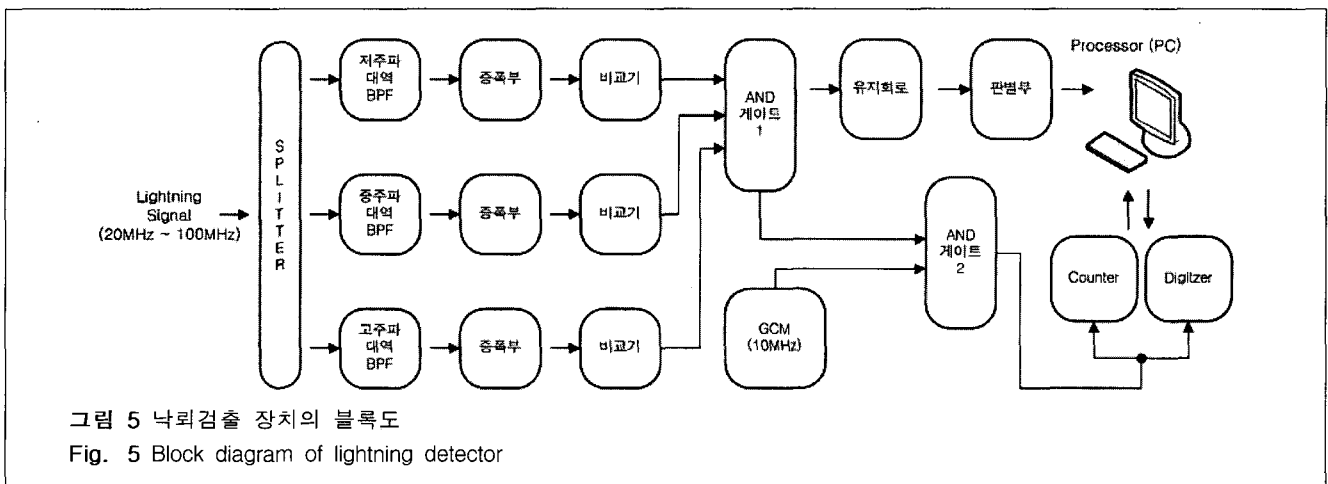


그림 5 낙뢰검출 장치의 블록도
Fig. 5 Block diagram of lightning detector

나타낸 것이다. 카운터는 GCM의 1PPS에 동기된 10MHz 클럭을 외부 클럭 입력으로 사용하며, 2개의 채널을 이용하여

낙뢰검출시점의 시각을 계산한다. 즉 카운터의 채널 1에서는 기준시점(예를 들어 낙뢰발생신호 발생시각)으로부터 낙뢰검출기의 낙뢰검출신호 시작시점까지의 시간을 매 검출 신호마다 카운팅하여 모든 스텝 리더 펄스에 대하여 저장한다. 그와 동시에 카운터의 채널 2에서는 기준시점으로부터 1PPS 신호의 시작시점까지의 시간을 카운팅한다. 따라서 카운터의 2개의 채널에서 얻은 정보를 이용하면 1PPS 신호를 기준으로 10MHz의 분해능으로 각각의 스텝 리더 펄스 신호에 대한 시각정보를 기록할 수 있다.

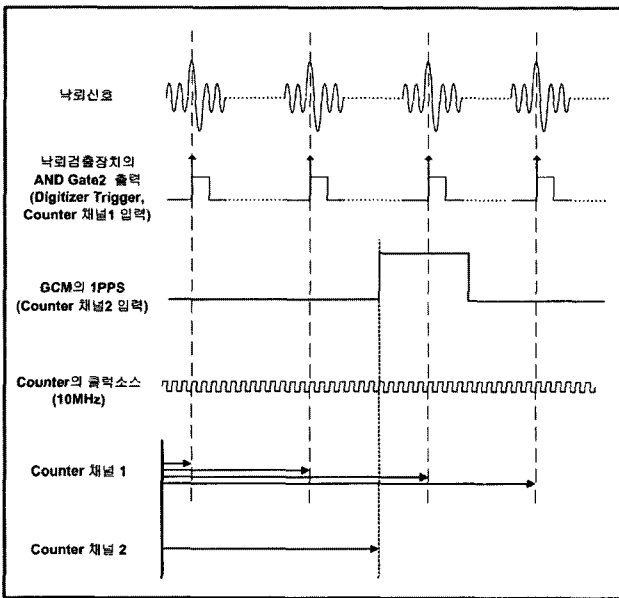


그림 6 시간정보 기록의 타이밍도
Fig. 6 Timing diagram for time tagging

낙뢰검출기의 판별부에서 컴퓨터에 낙뢰종료신호를 전송하면 컴퓨터에서는 카운터에 낙뢰 검출 시각의 전송을 요청한다. 이에 따라 카운터에서는 2개의 채널에서 구한 스텝 리더 펄스열의 검출시점들과 1PPS 발생시점까지의 카운터 값을 전송한다. 이때 1PPS 신호의 발생시점은 판별부의 낙뢰 발생신호 이후에 첫 번째로 입력된 1PPS 신호에 대한 값을 제공하며, 컴퓨터에서는 그림 4의 GCM의 TOD (time of date)를 이용하여 해당 1PPS 신호에 대한 GPS 시간(GPS time)을 알아낸다.

카운터를 이용하여 구한 낙뢰검출신호들의 시각정보는 100ns의 분해능으로 기록되며, 이는 30m의 거리 오차가 발생할 수 있음을 의미한다. 10m 이내의 3차원 위치 정확도를 갖는 TDOA 방식의 낙뢰추적 시스템을 구현하기 위해서는 PDOP (Position Dilution Of Precision)을 3이라 할 때 낙뢰 신호 획득 시스템의 거리 분해능이 약 3m 이내이어야 한다.[8] 낙뢰검출기의 AND 게이트2 신호가 GCM의 10MHz 신호에 동기되어 동작하기 때문에 디지털타이저와 카운터가 GCM의 10MHz 신호에 동기되어 동작하며, 디지털타이저에서 500MS/s로 샘플링하는 데이터의 시작시점은 10MHz 신호에 동기되어 있다. 따라서 저장된 신호의 시작시점으로부터 펄스

신호의 피크(peak)까지의 시간을 계산하면 2ns 분해능의 거리 정보를 구할 수 있고 그 결과 고정밀 낙뢰 추적 시스템에서 요구하는 분해능을 얻을 수 있다.

2.3.3 낙뢰 신호 저장 장치 및 멀티레코드 방법

앞에서 설명한 바와 같이 스텝 리더 펄스의 특성을 이용하여 평균 60us마다 발생하는 평균 1us의 짧은 낙뢰 펄스 신호가 발생하는 시점 부근의 데이터만을 저장하면 메모리 용량을 대폭 줄일 수 있다. 본 논문에서는 멀티레코드 방법을 이용하여 디지털타이저의 데이터 메모리를 효율적으로 사용하도록 구현하였으며, 그림 7은 이러한 멀티레코드 방법의 개념을 도시한 것이다. 낙뢰 검출기의 낙뢰발생신호가 입력되면 디지털타이저는 샘플링을 시작하고 샘플링한 데이터를 임시 메모리에 저장한다. 임시 메모리는 제한된 용량을 가지며, 1MByte인 경우 2ms의 데이터를 저장할 수 있다. 임시 메모리의 용량까지 데이터를 저장한 후에는 다시 메모리의 처음부터 데이터를 덮어 쓰는 순환적인 방법으로 데이터를 저장한다. 낙뢰발생신호 이후에 그림 5의 AND 게이트2의 출력에서 트리거(trigger) 신호가 입력되면 트리거 직전의 임시 메모리의 데이터 N개와 직후의 데이터 N개를 데이터 메모리에 복사한다. 복사가 끝나면 임시 메모리에 다시 샘플링한 데이터를 저장하다가 다음 트리거 신호가 입력되면 임시 메모리의 2N개의 데이터를 다시 데이터 메모리에 복사한다. 이와 같이 멀티레코드 방법을 이용하면 스텝 리더 펄스 사이의 불필요한 데이터를 제거함으로써 효율적으로 낙뢰 데이터를 저장할 수 있다.

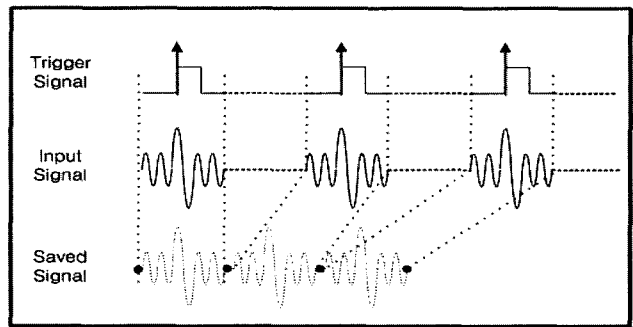


그림 7 멀티레코드 방법
Fig. 7 Multi-record method

낙뢰검출기의 판별부에서 디지털타이저에 낙뢰종료신호를 보내면 디지털타이저는 데이터 메모리에 저장된 낙뢰 데이터를 컴퓨터에 전송한다. 컴퓨터에서는 카운터에서 보낸 낙뢰 검출 시각정보와 디지털타이저에서 보낸 낙뢰 데이터를 이용하여 각각의 스텝 리더 펄스의 발생시각과 500MS/s로 샘플링한 펄스신호의 형상을 알아낼 수 있다.

디지털타이저와 카운터는 GCM의 10MHz 신호에 동기되어 동작하기 때문에 저장된 낙뢰 데이터의 시작시점은 10MHz 신호에 동기되어 있다. 또한 500MS/s로 샘플링한 낙뢰 데이터의 형상을 이용하면 시작시점으로부터 낙뢰 펄스의 피크까지의 시간을 2ns의 분해능으로 정확히 구할 수 있다. TDOA 측정치는 수신국간의 낙뢰검출시각의 차이로부터 얻

어지며, 본 논문에서는 그림 8의 상호상관(cross-correlation) 방법을 이용하였다. 즉, GCM에 의하여 서로 동기되어 있는 기준 수신국의 낙뢰 데이터와 다른 수신국의 데이터로부터 다음과 같은 상호상관함수를 구한다.

$$R_{s_i, s_1}(m) = \sum_{n=-N}^N s_i(n+l)s_1(n), \quad m = -M, \dots, M \quad (2)$$

식에서 $s_i(k)$ 는 i -번째 수신국의 낙뢰 데이터를 의미하며, 첫 번째 수신국을 기준수신국으로 가정하였다. 각각의 수신국에서 수신하는 낙뢰 신호는 검출시각만 다를 뿐 낙뢰의 형상은 매우 유사하므로 식 (2)의 상호상관함수를 최대로 하는 m 값을 구하면 두 개의 수신국간의 TDOA 측정치를 $2ns$ 의 분해능으로 구할 수 있다.

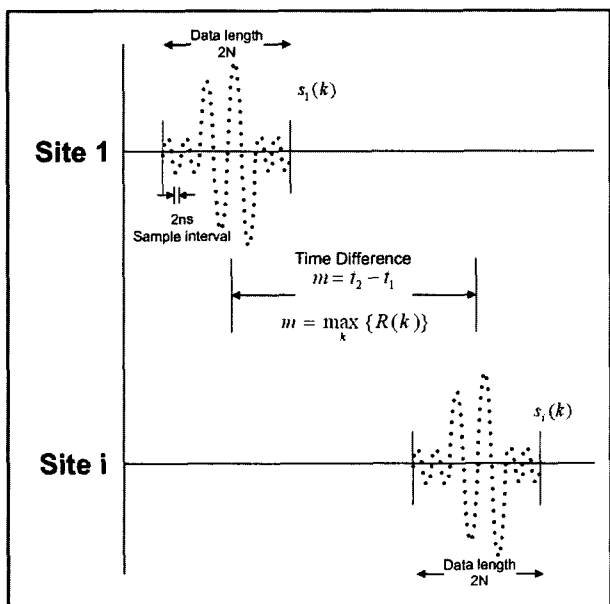


그림 8 상호상관함수를 이용한 TDOA 측정치
Fig. 8 TDOA measurements using cross-correlation

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 광대역 낙뢰신호 탐지 및 획득 시스템의 성능을 확인하기 위하여 현장실험을 수행하였다. 실험을 진행하기 전에 장비 설치지역의 전파환경을 분석하였다. 그림 9는 20~100MHz의 대역을 갖는 광대역 낙뢰탐지 안테나에서 정상시에 수신한 신호의 주파수 스펙트럼을 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 광대역 안테나에서 수신되는 주파수 대역 중에서 여러 부분의 협대역 주파수가 다른 용도로 사용되고 있다. 따라서 낙뢰 검출기의 오작동을 최대한 줄일 수 있도록 잡음레벨을 -40dB로 정의하고 낙뢰 검출기의 3가지 주파수 대역을 다음과 같이 설정하였다.

- 저주파대역 : 28~36MHz
- 중주파대역 : 58~66MHz
- 고주파대역 : 83~91MHz

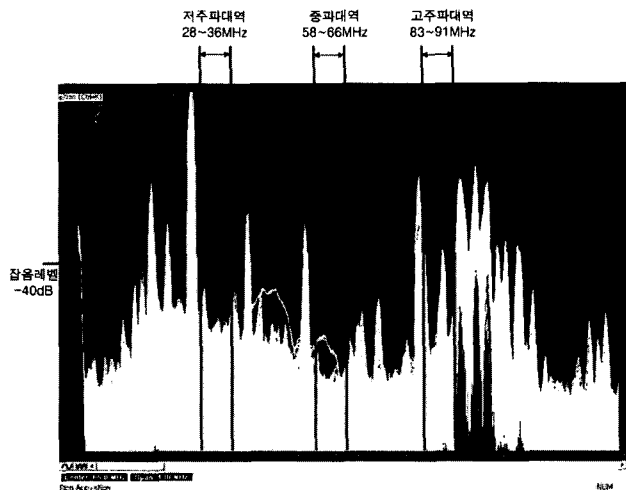


그림 9 광대역 안테나신호의 정상시 스펙트럼
Fig. 9 Spectrum of antenna signal at normal state

현장실험을 위하여 제안한 수신국 장비인 낙뢰신호 탐지 및 획득 시스템을 한 개 구성하여 대전지역에 설치하였다. 2006년 7월부터 9월까지 3개월간 현장 실험을 진행하였으며, 먼저 제안한 시스템의 탐지 성능을 확인하였다. 성능 비교를 위하여 전력연구원에서 운영하고 있는 LPATS 네트워크의 낙뢰 데이터를 이용하였으며, 낙뢰 발생시각을 이용하여 탐지 성능을 비교하였다. 그림 10은 두 개의 시스템에서 탐지한 낙뢰의 발생회수를 월별로 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안한 시스템이 한전의 시스템보다 약 20%가량 더 높은 탐지확률을 보였다. 한전의 시스템은 여러 개의 수신국을 이용하여 종합적으로 낙뢰를 판정하고 있으며, 제안한 시스템은 현재 하나의 수신국 장비를 이용하여 낙뢰를 탐지하고 있다. 따라서 제안한 시스템에서 추가로 탐지한 신호의 대부분은 오경보라 판단되며, 제안한 수신국 장비를 여러 개 이용하여 그림 3과 같이 낙뢰 추적 시스템을 구성한 후 종합적으로 낙뢰를 탐지하게 되면 이러한 오경보를 줄일 수 있을 것이다.

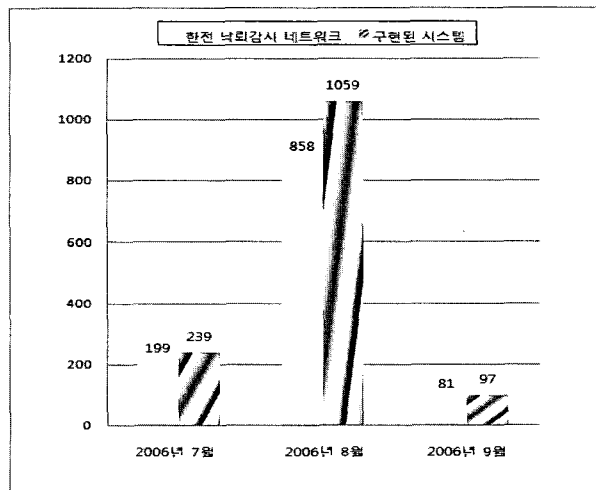


그림 10 구현된 시스템과 한전시스템의 탐지성능 비교
Fig. 10 Comparison of detection performance

두 번째 실험으로써 제안한 시스템으로 획득한 낙뢰 데이터를 이용하여 스텝리더 펄스의 성질을 분석하였다. 스텝리더 펄스의 폭은 펄스가 발생한 위치에 따라 변화한다고 알려져 있으며[6], 펄스의 크기는 지상 수신국과의 거리에 따라 달라진다. 즉, 스텝 리더가 대지에 가까이 진행할수록 펄스의 폭과 크기가 커진다. 그림 11은 한 개의 낙뢰가 발생하는 과정 중의 스텝리더 펄스의 크기와 폭을 시간에 따라 나타낸 것이다. 시간이 지날수록 스텝리더는 대지로 접근하며, 펄스의 크기와 폭이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

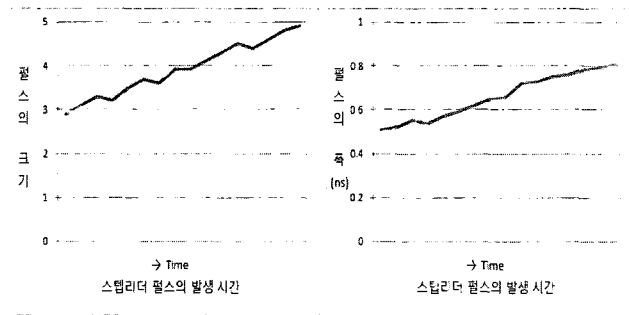
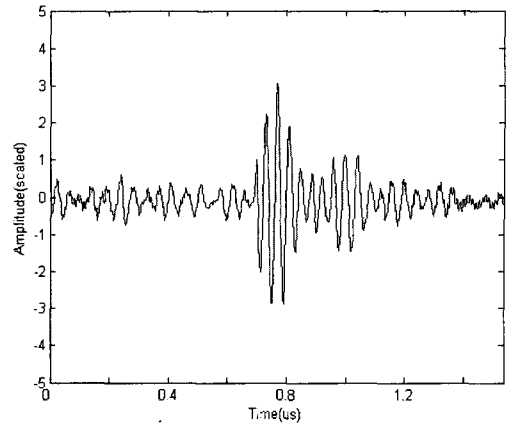


그림 11 스텝리더 펄스의 파형과 펄스폭
 Fig. 11 Amplitude and width of stepped leader pulse

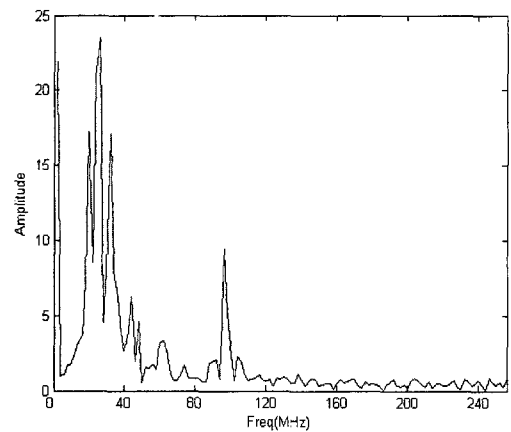
다음으로 스텝 리더 펄스의 통계적 특성을 분석하기 위하여 100회의 낙뢰 데이터를 이용하여 각각의 낙뢰에서 발생하는 스텝 리더 펄스의 특성을 분석하였다. 1개의 낙뢰 데이터는 평균 278개의 스텝리더 펄스를 포함하고 있으며, 표 1은 스텝 리더 펄스의 폭과 펄스 발생 간격의 평균과 분산을 나타낸 것이다. 표에서 펄스의 폭은 반파고 폭(half-peak width)를 나타내며, 각각의 펄스의 첨값(peak value)의 반의 크기를 갖는 구간의 폭을 의미한다. 2.1절에서 설명한 스텝리더 펄스의 성질 (평균 1us의 펄스폭과 60us의 펄스 간격)은 외국의 낙뢰 데이터에 대한 값이며, 낙뢰의 특성은 지역에 따라 차이를 보인다고 알려져 있다.[6] 이번 실험에서 얻은 통계값은 외국의 데이터와 비교하여 펄스 폭은 약 60%, 펄스 간격은 약 45%이며, 제안한 시스템을 설계할 때 가정했던 조건 내에 포함됨을 확인하였다. 마지막으로 저장된 스텝리더 펄스 중에 대표적인 데이터를 선택하여 파형을 관찰해 보았다. 그림 12는 측정된 스텝 리더 펄스의 파형 및 FFT (Fast Fourier Transform)를 통하여 구한 주파수 스펙트럼을 도시한 것이다.

표 1 스텝 리더 펄스의 폭 및 간격의 통계값
 Table 1 statistical values of stepped leader pulses

| | 평균 | 분산 |
|----------------|--------|--------|
| 스텝 리더 펄스의 폭 | 0.58us | 0.0032 |
| 스텝 리더 펄스 간의 간격 | 26.4us | 38.4 |



(a) 스텝 리더 펄스 파형



(b) 주파수 스펙트럼

그림 12 스텝리더 펄스의 파형과 스펙트럼
 Fig. 12 Waveform and spectrum of stepped leader pulse

4. 결 론

본 논문에서는 TDOA 측위방식의 고정밀 3차원 낙뢰 추적 시스템을 구현하기 위한 낙뢰신호 탐지 및 획득 시스템을 제안하였다. 제안한 지상 수신국 시스템은 수신국간 시각 동기 오차로 인한 오차가 3m 이내이고 저장된 낙뢰 데이터의 해상도가 60cm가 되도록 설계하였다. 또한 낙뢰 데이터의 저장효율을 높이기 위하여 멀티레코드 기법을 이용하였다. 현장실험을 통하여 제안한 시스템의 낙뢰 탐지성능을 확인하였으며, 제안한 낙뢰신호 탐지 및 획득 시스템이 낙뢰신호를 정확히 탐지하고 신호를 효율적으로 획득할 수 있음을 보였다. 또한 국내에서 발생하는 낙뢰 데이터의 통계적 성질을 분석하였으며, 스텝리더 펄스의 폭이 약 0.6us이고 펄스 간격이 약 30us임을 확인하였다. 제안한 시스템을 이용하면 고정밀의 TDOA 측위 방식의 낙뢰 추적 시스템을 구현할 수 있으며, 이를 이용하여 정밀한 낙뢰 발생 위치 및 시각 정보를 획득함으로써 낙뢰사고의 원인을 분석하고 전력 설비의 최적 설계의 기본 자료로 사용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] 우정욱, 심응보, “낙뢰측정에 대한 기술동향과 LPATS 데이터에 의한 한반도 낙뢰현황”, 한국조명전기설비학회지, 제17권 제4호, pp. 16-23, 2003. 8
- [2] I. Oppermann, M. Hämäläinen, and J. Linatti, UWB Theory and Applications, John Wiley & Sons Ltd., 2004
- [3] R. Mardiana and Z. Kawasaki, “Broadband Radio Interferometer Utilizing a Sequential Triggering Technique for Locating Fast-Moving Electromagnetic Sources Emitted from Lightning”, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Volume 49, No. 2, pp. 376-381, April 2000
- [4] Y. T. Chan and K. C. Ho, “A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location”, IEEE Trans. Signal Processing, Volume 42, No. 8, pp. 1905-1915, Aug. 1994
- [5] M. A. Uman, “Natural Lightning”, IEEE Trans. Industry Applications, Volume 30, No. 3, pp. 785-790, May/June 1994
- [6] V. A. Rakov and M. A. Uman, Lightning Physics and Effects, Cambridge University Press, 2003
- [7] H. Yulin, Y. Jianyu, and X. Jintao, “Synchronization Technology of Bistatic Radar System”, Proc. 2006 International Conference on, Communications, Circuits and Systems, Volume 4, pp. 2219 - 2221, Guangxi/China, June 2006
- [8] B. W. Parkinson, J. J. Spilker Jr. P. Axelrad, and P. Enge, Global Positioning System: Theory and Applications, AIAA Inc., 1996

저 자 소 개



송승헌 (宋承憲)

1980년 12월 4일생. 2006년 충남대 전기정보통신공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 정보통신공학과 석사과정.
 Tel : 042-821-7607
 Fax : 042-824-6807
 E-mail : lsphoenix@hanafos.com



김동혁 (金棟赫)

1980년 1월 15일생. 2005년 충남대 전기정보통신공학부 졸업. 2007년 동 대학원 정보통신공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 정보통신공학과 박사과정.
 Tel : 042-821-7607
 Fax : 042-824-6807
 E-mail : oneoctave@ivlab.cnu.ac.kr



이성호 (李誠浩)

1979년 6월 20일생. 2005년 충남대 전기정보통신공학부 졸업. 2007년 동 대학원 정보통신공학과 졸업(석사).
 Tel : 042-821-7607
 Fax : 042-824-6807
 E-mail : yprush@nate.com



우정욱 (禹貞旭)

1968년 9월 19일생. 1992년 경북대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한전 전력연구원 선임연구원
 Tel : 042-865-5802
 E-mail : jwwoo@kepri.re.kr



성태경 (成泰慶)

1961년 4월 12일생. 1984년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 충남대 전기정보통신공학부 교수.
 Tel : 042-821-5660
 Fax : 042-824-6807
 E-mail : tksaint@cnu.ac.kr