

# 나로 우주센터 종합낙뢰감지시스템 소개 및 기술동향

글/김 홍 일 khi@kari.re.kr, 최 미 연, 국 봉 재

한국항공우주연구원 우주센터 기술관리그룹

## 초 록

현재 전라남도 고흥 외나로도에서는 발사체를 발사하기 위한 우주센터를 건립 중에 있다. 우주센터 내에는 추적레이다, 발사대, 발사통제시스템, 기상 장비 등 발사를 위한 그리고 발사 후의 발사체 추적을 위한 장비가 건설 중이다. 본 글에서는 우주센터 기상장비 중에서 낙뢰현상을 감지할 수 있고 낙뢰의 이동방향을 추적할 수 있는 종합낙뢰감지시스템에 대하여 낙뢰의 관측방법과 국내외에서 낙뢰를 감지하여 실제 기상청이나 Launch Site에서 사용하고 있는 사례를 소개하고 우주센터에 설치 중인 종합낙뢰감지시스템의 성능과 앞으로의 활용가능성에 대하여 알아보기로 하겠다.

주제어 : 낙뢰관측, TOA(Time-Of-Arrival), MDF(Magnetic Direction Finding)

## 1. 서 론

보통 상태에서 대기는 전기 전도율이 대단히 낮아서 절연체로 생각되지만, 다량의 양(+)전하와 음(-)전하가 분리되어 대기 중의 전위 경도가 일정한 값을 초과하면 공기분자의 전리효과가 일어나 전자와 이온(ion)에 의한 전도로가 형성되어 순간적으로 전류가 흐르게 된다. 이것을 불꽃 방전 또는 뇌방전이라고 하고 이 때 발생하는 빛을 낙뢰(Lightning)이라 한다. 이러한 낙뢰의 종류를 크게 분류하면 다음과 같다.

- 운대지 방전 (Cloud To Ground Lightning Discharge) : 뇌운과 지면사이에서 발생하는 뇌방전 (대지방전)
- 운간 방전 (Cloud To Cloud Lightning Discharge) : 서로 다른 뇌운 사이에서 발생하는 뇌방전
- 운내 방전 (Intracloud Lightning Discharge) : 동일 뇌운 내에서 음(-)극성과 양(+ )극성 전하군 사이에서 발생하는 뇌방전

낙뢰관측을 위해서 수십Km 간격으로 여러 지점에 센서를 설치하여 낙뢰의 위치를 측정하는 시스템이 개발되었다. 시스템의 종류에는 여러 지점에서 동시에 방위를 측정하여 낙뢰발생 위치를 표정하는 시스템과 여러 지점에서 관측된 전자파의 도달시간차를 측정하여 방전로의 공간 분포를 표정하는 시스템이 실용화되고 있다. 이들의 시스템을 이용하여 관측된 자료는 뇌방전 연구 및 악기상 감시에 유용하게 활용하고 있다.

낙뢰관측 방법은 크게 도달 시간차법(TOA : Time-Of-Arrival) 방식과 방향탐지법(MDF : Magnetic Direction Finding)방식이 있다. TOA 방식은 낙뢰가 발생하여 각각의 센서에 도달한 시간의 차이를 이용하여 낙뢰발생의 위치를 구하는 방법이고, MDF방식은 낙뢰가 발생한 방향을 관측하여 낙뢰발생 위치를 구하는 방법이다. 따라서 TOA 방식을 이용한 낙뢰탐지에는 시간정확도가 중요하고, MDF방식에서는 진폭을 정확하게 설정하는 것이 중요한 변수로 작용

한다.

본 글에서는 앞서 언급한 낙뢰 감지 시스템에 대한 관측방법과 선진국의 낙뢰관측 현황을 살펴보고, 나로 우주센터에서 적용할 종합낙뢰감지시스템에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 낙뢰관측방법

### 2.1 TOA (Time-Of-Arrival) 방식

이 방법은 Noise Pulse의 파두부분의 도달시간차를 복수개의 안테나에서 측정하는 것에 의해서 Pulse원의 방향을 구하는 것이다. Base Line이 Noise Pulse 사이의 시간에 비해서 짧은 경우, Pulse는 근접해서 설치된 각 수신장치에 동일 순서로 도달한다. 즉 수신된 Pulse가 동일한 방전점에서 방사된 것으로 있다고 판정이 용이하다. 따라서 Pulse원의 2차원 표정에는 아주 우수하다.

Pulse원의 3차원 표정은 짧은 Base Line을 갖는 안테나 쌍을 수 Km 떨어져 복수조 설치하는 것에 의해서 행하지만 Pulse가 다수 방사되는 경우에는 원거리의 2개소에서 수신된 Pulse에 대응시키는 것이 어렵다고 하는 문제가 있다.

Base Line이 긴 경우에는 Pulse 발생의 시간 간격이 수신장치 사이의 전자파 시간과 같은 정도로 되기 때문에 수신국에서 관측되는 Pulse는 중첩된다든지 Pulse 순서가 역전한다든지 하는 일이 생기고 동일 타원으로부터 Pulse와 identification하는 것은 어렵게 된다. 또 등방적으로 전자파방사하지 않는 방전원은 Pulse의 identification을 곤란하게 한다는 문제가 있다.

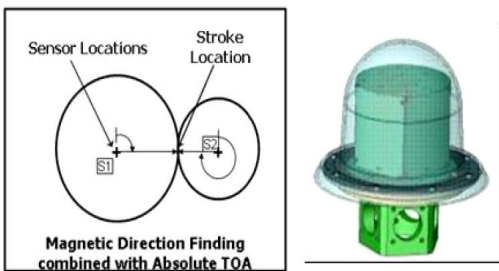


그림 1. TOA방식에 의한 낙뢰위치 결정

도달 시간차(TOA) 방식만을 이용하여 2개의 센서로 낙뢰를 탐지할 경우, 실제 낙뢰 위치가 아닌 다른 위치를 낙뢰 위치로 잘못 표시할 수 있다. 따라서 TOA방식을 이용하여 정확한 낙뢰 위치를 얻기 위해서는 최소한 3개 이상의 낙뢰센서가 필요하다.

### 2.2 MDF(Magnetic Direction Finding) 방식

방향탐지방법(MDF : Magnetic Direction Finding)은 낙뢰로부터 발생한 전자파가 도달되는 방향을 측정하여 2개의 안테나로부터 낙뢰의 위치를 결정하는 방식이다. 따라서 방향탐지방법(MDF : Magnetic Direction Finding) 방식에서는 진북을 정확하게 설정하는 것이 중요하다. 만약 두 개 혹은 세 개의 센서에서 방전이 감지된다면, 이에 따라 최적의 방법은 감지된 센서의 angle error를 최소화하는 것이다.

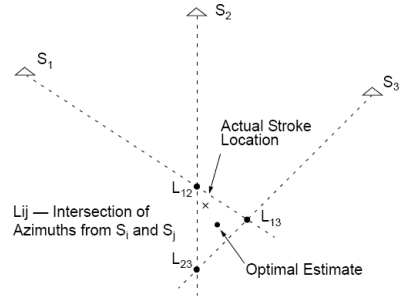


그림 2. MDF방식에 의한 낙뢰위치 결정

위의 세 개의 점(L12, L13, L23)은 단지 두 개의 센서에서 감지되었을 경우 가능한 위치를 보여준다. 특히 만약 방전이 두 개의 센서 선상에서 일어난다면, 이 방전은 단지 하나의 센서에서 일어난 것으로 인식이 되며, 이 측정된 방위각의 오류는 위치결정에 상당한 영향을 미치게 된다. 어떤 환경에서는 교차점이 전혀 형성하지 않은 경우도 있다.

### 2.3 방향탐지법(MDF)과 도달시간차법(MDF) 합성에 의한 방식

방향탐지방법(MDF : Magnetic Direction Finding)

과 도달시간차법(TOA : Time Of Arrival)합성에 의한 낙뢰감지시스템 관측원리는 TOA 의 장점과 MDF의 정확성을 결합시켜 탐지효율과 위치정확성을 높이는 방법이다. 관측되는 주파수대는 LF/VLF이며, 시간은 GPS에 의하여 동기화되어 있다. 정확한 방전의 위치를 탐지하기 위해서는 3개의 IMPACT Sensor가 필요하다. 한편 LDARII(Lightning Detection And Ranging System) 센서는 TOA 방식을 이용하여 구름방전의 위치를 결정하는 센서로써 VHF(Very High Frequency) 주파수대를 사용하고 있다. 구름방전의 3차원적인 모습을 관측하기 위해서는 최소 5개의 센서가, 이차원적인 모습의 관측을 위해서는 최소 4개의 구름방전 센서가 있어야 한다.

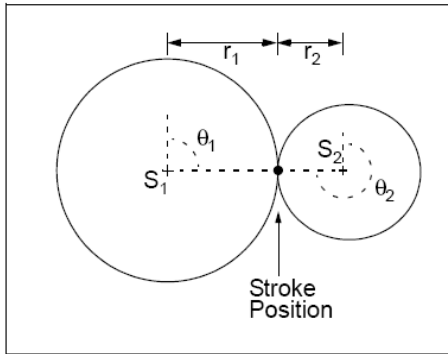


그림 3. 두 개의 센서 사이에서의 IMPACT 방법

IMPACT 알고리즘은 Direction Finding(DF), TOA(Time Of Arrival), 합성(DF/TOA)방식의 결합으로 인하여 정보를 이용할 수 있다.

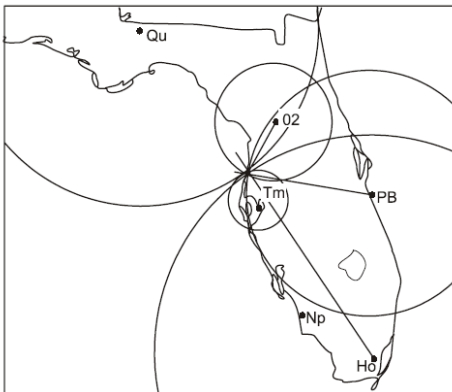


그림 4. Florida 인근의 낙뢰감지센서

### 3. 국내 · 외 적용사례

#### 3.1 선진국의 낙뢰 관측망

미국의 낙뢰 관측망은 처음에는 뇌방전의 자계를 측정하는 방향 탐지(DF : Detection Finder) 방식으로 구축되었으나, 1993년에 기존의 DF방식에 시각 도달차(TOA : Time Of Arrival) 방식을 추가하여 제작된 IMPACT방식을 부분적으로 채택하여 재구축되었으며, 오늘날에는 시각 도달차 방법을 이용하는 LPATS 센서 70여개와 TOA와 DF방식을 합성하여 낙뢰위치를 결정하는 IMPACT 센서 약50개로 네트워크를 구성하여 미국 전역에서 발생하는 낙뢰현상을 감시하고 있다.

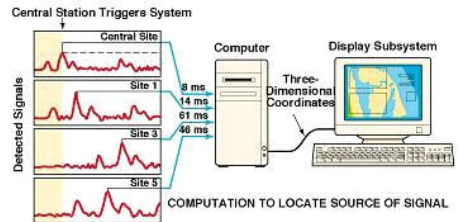
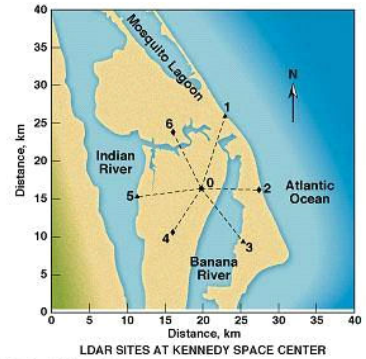


그림 5. Kennedy Space Center의 LDAR System

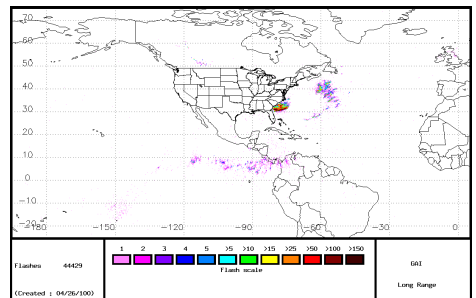


그림 6. 미국의 낙뢰감지시스템 (IMPACT센서)

미 공군 45전대는 LCC(Lightning Commit Criteria)를 판단하기 위해 많은 기상시스템을 사용한다. 다양한 낙뢰 센서들은 장점과 약점을 가지고 있으므로 지역적인 낙뢰를 잘 분석하기 위해 그것들을 공동적으로 결합시켜 사용한다. Lightning Detection and Ranging(LDAR)시스템은 In-Cloud, Cloud-to-Cloud, Cloud-Air, Cloud-to-Ground Lightning을 감지하는 7개 안테나를 이용하여 전자과의 도달시간차를 측정하는 시스템이다. Cloud to Ground Lightning Surveillance System(CGLSS)는 short-baseline LDAR이며 Launch Pad Lightning Warning System(LPLWS)는 31개의 지상 전계측정장비(EFM : Electric Field Mill) 네트워크이다.

일본에서는 1980년대부터 전력회사 등에서 LLP(방향 탐지 방법 이용)System 과 LPATS System(시간 도달차 방법 이용)을 도입, 설치하여 운용 중에 있으며, 1980년대 후반부터 일본 기상청 및 기상협회, 관서전력 등에서 SAFIR System(간접계 방법 이용)을 도입하여 설치·운영 중에 있다.

프랑스와 스웨덴 기상청에서는 1980년대 후반부터 낙뢰관측 시스템을 설치하여 운영 중에 있고, 캐나다, 스페인, 뉴질랜드 기상청에서는 1990년대 후반부터 낙뢰관측 시스템을 도입 설치하여 운영 중에 있다.

### 3.2 우리나라의 낙뢰 관측망

기상청은 1887년에 낙뢰관측시스템(LLP)을 도입하여 한반도에서 발생하는 낙뢰현상을 관측하여 예보업무에 활용하여 왔다. LLP 시스템은 수감부 10대와 분석기 및 표출기 각 1대로 구성되어 낙뢰가 발생할 때 낙뢰 발생위치·시간·강도·극성 등을 관측하였다. 또한 이러한 관측 자료를 분석하여 낙뢰발생 빈도분포, 극성분포, 일수분포 등을 수록한 낙뢰연보를 발간하여 활용하고 있다. 그러나 장비의 노후화로 인한 관측정확도 저하 문제가 발생하여, 2001년에 최첨단 신 낙뢰관측시스템(TLDS : Total Lightning Detection System)을 도입·설치하여 운영 중에 있다. 새로운 낙뢰관측시스템으로 기존의 시스템에서 관측할 수 없었던 구름방전을 포함한 다양한 관측 자료의 생산이 가능하게 되었다.

기상청에서 2001년 도입한 TLDS는 센서 부분과

분석기 그리고 표출기 부분으로 구성되어 있다. 센서의 종류에는 주로 대지방전(낙뢰)을 탐지하는 IMPACT ESP 센서와 구름방전을 관측할 수 있는 LDAR II 센서가 있다. 기상청은 IMPACT ESP 센서 7개와 LDARII 센서 17개로 낙뢰 관측 장비 네트워크를 구성하고 있다.(그림7 참조)

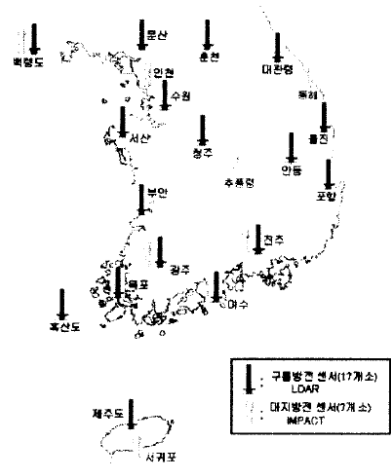


그림 7. 기상청에서 운영 중인 낙뢰관측시스템

한국전력은 1995년도에 TOA(Time Of Arrival) 원리를 이용한 낙뢰관측시스템을 도입하였다. 국내에서는 총 6개소의 센서가 설치되어 운용하고 있었다. 한국전력연구원에서는 2005년 기존의 시스템을 토대로 KLDNet(KEPCO Lightning Detection & Information Network)이라는 실시간 낙뢰정보 취득을 위한 시스템과 관련 네트워크를 8개소에 구축하였다.

### 4. 우주센터 종합낙뢰감지시스템 소개

나로 우주센터에 설치 예정인 종합낙뢰감지시스템은 우주센터 인근 반경 100Km의 낙뢰현상(Intra Cloud, Cloud to ground lightning)을 측정하여 Localization Accuracy는 주요 Coverage 범위 내에서 1km 이내, Detection Efficiency는 주요 커버리지 범위에서 90% 이상, 우주센터 반경 20km 내에는 Lightning Localization 정확도가 500m 이내를

목표로 하고 있다. 본 절에서는 나로 우주센터 인근에 설치 예정인 TLDS에 대하여 측정원리, 구성, 특성 등을 소개하고자 한다.

### 4.1 종합낙뢰감지시스템의 측정원리

TLDS는 기본적으로 VHF와 LF를 감지하는 안테나로 구성되어 있다. 우선 VHF 간섭계는 안테나 배열이 서로 다른 안테나로부터 받은 전자기파의 Phase Difference를 기반으로 하여 파의 도착 방향을 탐지하게 된다. 이차원 또는 삼차원 공간의 위치는 조합에 의한 삼각 측량을 통해서, 또 거리상 떨어져있는 최소 둘 이상의 VHF 간섭계 안테나 스테이션의 GPS로 연동하는 각에 대한 자료에 의해 얻을 수 있다.

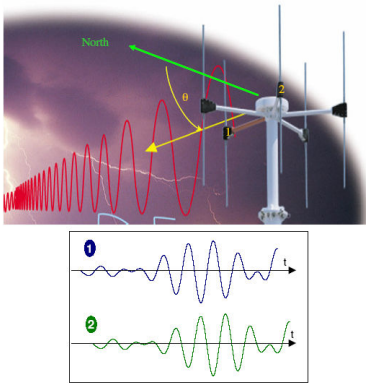


그림 8. VHF Interferometer Technology

VHF센서들은 5개의 쌍극 안테나로 이루어진 원형 간섭계이고 전자기파를 양극을 통해 수신하며 각 쌍극 안테나 수신방향에 연관된다. 전파시스템은 전자파 수신, 필터링, 증폭, 크기 제한, 통합 위치 측정을 수행하는 5 Phase Difference 측정을 실행한다.

LF의 감지원리는 MDF(Magnetic Direction Finding)와 TOA(Time Of Arrival)의 결합으로 Cloud-to-Ground를 측정하게 된다. TLDS의 CG 식별 기능은 Cloud-to-Ground에 발생하는 번개의 특성에 관한 정보를 도출해내는 것이다. 이는 Cloud-to-Ground의 Return Stroke의 전기장 방사 요소의 LF/MF의 광역 분석을 허용하는 감도가 좋은 용량형 안테나에 기반하고 있다. TLDS는 CG파형에 고나한 정보를 GPS를 이용하여 매우 정확한

시간을 측정한다. 센서와 안테나는 완벽한 실행과 개인의 안정성을 보장하기 위해 주기적으로 자체 교정을 실행한다. 번개의 타격 특성들을 Return Stroke 경로 방사의 이동선 모델에 근거하고, 유한한 지상전도성을 고려하여 계산할 수 있다.

### 4.2 낙뢰감지시스템의 구성

우주센터의 종합낙뢰감지시스템의 구성은 아래와 같다.

- VHF Antenna : 5set
- LF Antenna : 5set
- GPS Antenna(Time Stamping)
- Computer
  - LTS(Lightning Tracking Software)
  - TWXS(Thunderstorm Warning System)
  - DAM(Data Analysis Module)
- Rack
  - 5 VHF preamplifier boards (THF)
  - 5 Interferometric receiver boards (ITF)
  - 1 oscillator / calibration board (OCB)
  - 1 signal analysis board (SAM)
  - 1 detection processor board (ACQ)
  - 1 main digital board (MDB)
  - 1 ancillary control board (OPM)
  - 1 power supply interface board (ALM)
  - Uninterruptible Power Supply (UPS)
  - Data Communication System



그림 9. 종합낙뢰감지시스템 Rack 구성도

### 4.3 종합낙뢰감지시스템의 감지결과

우주센터 인근 지역에 종합낙뢰감지시스템을 설치하기 위한 감지 요구조건은 표4와 같다. 이러한 조건으로 낙뢰감지안테나의 설치 사이트를 조사하여 설치 네트워크를 구성하였다. 낙뢰감지시스템 사이트는 총 5개의 사이트에 설치될 예정이고 지반 조건, 가시선 확보와 기계적인 조건을 고려하여 통신철타꼭대기 위에 기존의 피뢰침을 제거하고 LDS 안테나를 부착시키는 방식을 따른다. 각각의 안테나들은 낙뢰 발생 시 하나의 네트워크를 형성하여 낙뢰의 위치와 시간을 정확하게 감지하게 된다.

표 1. 종합낙뢰감지시스템의 감지성능 요구조건

Legend	조 건
Detection Efficiency	≥90%
Detection Coverage	Maximum 200Km radius of space center
Localization Accuracy	≤500m for CG ≤1000m for CC & IC
Discharge Discrimination Accuracy	≥90%

낙뢰감지안테나는 우리나라 낙뢰의 주 이동방향을 미리 예측할 수 있도록 우주센터를 중심으로 북서쪽에 낙뢰감지 안테나를 주로 설치할 수 있도록 위치를 설정하였다. 또한 설치 사이트에 낙뢰감지 안테나를 실제로 설치한 후 가상의 낙뢰가 발생하였을 경우를 대비하여 종합낙뢰감지시스템에서 감지할 수 있는 감지 효율, 감지 범위, 낙뢰위치, 정확도를 시뮬레이션을 수행하였다.

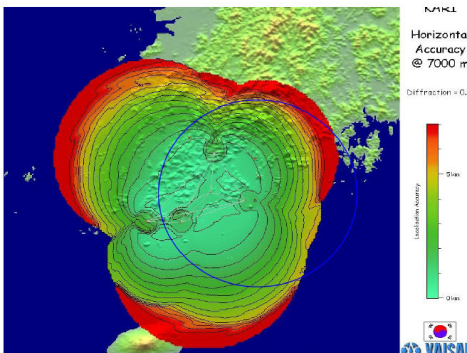


그림 10. Cloud lightning (IC/CC) Detection Efficiency & Location Accuracy

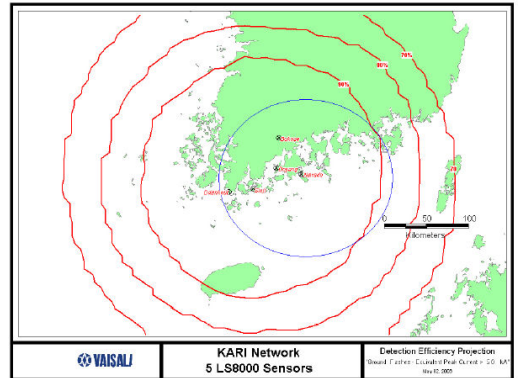


그림 11. Cloud to Ground (CG) Lightning Detection Efficiency

## 5. 결론

종합낙뢰감지시스템은 우주센터의 발사를 위한 중요한 기상장비의 하나로서 발사시점에 낙뢰관측 및 이동경로를 예상하여 낙뢰 관련된 유용한 정보를 생성해 낼 것이며 이 자료들은 KSLV-1을 비롯하여 위성 발사기준을 수립하기 위한 기초자료로 활용될 것이다.

## 참고문헌

1. 기상청, “낙뢰연보2002”, 2002, pp.7-22
2. 한국전기연구소, “뇌격위치 표정장치를 이용한 한반도의 낙뢰통계 작성 연구(I)” 1995, pp.8-47
3. 한국전력, “한전낙뢰감지네트워크 KLDNet”
4. 공보엔지니어링, “한국항공우주연구원 우주센터 기상장비 사양서” 2002, pp.27-53
5. Site Survey Report, 2006