나로우주센터 낙뢰감지시스템 최적화 방안 연구

김홍일 · 하종성 · 최은호 · 서성규*,†

한국항공우주원 비행안전기술실 · *전남대학교 환경시스템공학과

(2018년 11월 30일 접수, 2018년 12월 10일 수정, 2018년 12월 14일 채택)

A Study on the Optimization of Lightning Detection System in Naro Space Center

Hong-Il Kim · Jong-Sung Ha · Eun-Ho Choi · Seong-Gyu Seo*,†

Flight Safety Technology Division, Korea Aerospace Research Institute,
**Department of Environmental system Engineering, Chonnam National University*

(Received 30, November 2018, Revised 10, December 2018, Accepted 14, December 2018)

Abstract

The lightning detection system operated by the Naro space center of Korea Aerospace Research Institute (KARI) is an equipment introduced in 2016 and consist of a total of six sites (Naro space center, Jeju tracking station, Suncheon meteorological observatory, Jangheung weather station, Jindo weather station and Gochang meteorological observatory). The lightning detection algorithm uses a time of arrival method and requires at least three antennas to estimate the position of the lightning stroke. That is, the lightning detection system algorithm estimates the distance based on the signal arrival time from the lightning return path to each sensor antenna, generates a circle having the radius of the distance reached from each antenna as its center, That is the position where the lightning occurs. In this study, sensor calibration tool is used for the detection efficiency improvement of the lightning detection system operated at Naro sapce center. For multiple lightning signals detected in the lightning network, real-time analysis and calibration work were performed using the sensor calibration tool to improve the lightning efficiency. Further the change in detection efficiency before and after calibration of the Naro space center lightning detection system was verified by comparing observational data with the Korea Meteorological Administration (KMA)' s lightning detection system for areas near the Naro space center.

Keywords : Lightning detection system, Naro space center, Time of arrival, Calibration

1. 서 론

맑은 날 지표면은 음(-)전하로 대전되어 있고, 대류권 상부는 양(+)전하로 대전되어 있다. 그러나 적란운이 발달하게 되면 구름 내부에서 전하분리가 일어나면서 구름의 상부에는 양(+)전하가 축적되고, 구름의 하부에는 음(-)전하가 축적된다. 이 때 음으로 대전된

†Corresponding author E-mail: sseo@jnu.ac.kr

구름의 하부는 구름의 밑에 있는 지표면에 양(+)전하를 유도시키게 된다. 공기는 매우 좋은 절연체이므로 뇌우가 발달하면서 뇌우의 하부와 지표 사이에 전위차가 커지게 되어 임계값을 초과하면 대기 중의 낙뢰가 발생된다.

낙뢰는 뇌격(Stroke)이라 불리는 성분방전으로 되어 있다. 뇌격은 구름 밑으로부터 지면을 향해서 하강하는 비교적 약한 빛의 선도뇌격(Leader stroke)과 이것이 지면에 도달하는 순간, 같은 길을 통해서 지면으로부터 구름을 향해서 상승하는 매우 밝고 빠른 속도의 방전 즉, 복귀뇌격(Return stroke)으로 되어 있다. 낙뢰는 단 한 번의 뇌격(Single stroke)으로 끝나는 것과 몇 회로부터 몇 십 회의 뇌격을 반복하는 것이 있는데 후자를 다중뇌격(Multiple stroke)이라 한다. 낙뢰가 흐르는 통로의 공기는 20,000~30,000℃ 정도의 온도까지 가열되므로 공기가 급격히 팽창하면서 충격파가 발생되는데, 이 때 생기는 파열음이 천둥이다. 천둥 그 자체는 0.5초 이내의 순간적인 현상이지만, 음파이므로 한참 후에 들린다. 천둥이 들리는 범위는 약 10 ㎞ 정도이다. 음속은 340m/s이므로 낙뢰의 섬광을 본 후에 천둥소리가 3초 만에 들리면 1 ㎞, 6초 만에 들리면 2 ㎞ 떨어진 곳에서 낙뢰가 발생하였다는 것을 알 수 있다.

한국항공우주연구원 Korea Aerospace Re-search Institute (KARI) 나로우주센터에서 운영하고 있는 낙뢰감지시스템은 발사체 비행 준비 및 비행 과정에서 대기 중에서 발생할 수 있는 낙뢰로부터 비행안전성을 확보하기 위해서 2016년에 도입된 장비로 총 6 사이트(나로우주센터, 제주추적소, 순천 기상대, 장흥 관측노장, 진도 관측노장, 고창 기상대)로 구성되어 있다. 낙뢰감지시스템은 주변 환경의 영향을 많이 받기 때문에 도입 이후 최적의 상태를 유지하는 것이 중요하므로 본

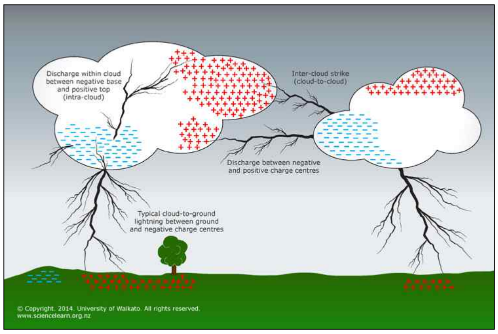

Fig. 1. Lightning formation(a spark discharge between centres of positive and negative discharge)

연구에서는 낙뢰감지시스템의 Sensor calibration tool을 활용하여 실시간 분석 및 교정작업을 수행함으로써 낙뢰감지 효율을 개선하였다. 또한 낙뢰네트워크에서 다양한 낙뢰파형을 판별하기 위하여 센서 최적화 작업을 수행하여 낙뢰감지 효율을 개선하였으며, 나로우주센터 낙뢰감지시스템 교정 전・후의 감지효율 변화를 확인하기 위하여 기상청 Korea Meteorological Administration (KMA) 낙뢰감지시스템과 관측자료 비교를 통하여 감지효율 변화를 검증하였다.

2. 연구 방법

2.1. 낙뢰감지시스템

2.1.1. 감지원리

나로우주센터의 낙뢰감지시스템은 도달시간차(Time of arrival) 알고리즘을 사용한다. 이 방법은 Noise pulse의 파두부분의 도달시간차를 여러개의 안테나에서 측정하는 것에 의해서 Pulse 방향을 구하는 것이다. Base line이 Noise pulse 사이의 시간에 비해서 짧은 경우, Pulse는 근접해서 설치된 각 수신장치에 동일 순서로 도달한다. 특히 낙뢰(Lightning)가 발생한 후 각 센서에 도달한 시간을 이용하여 낙뢰의 위치를 추정하기 때문에 최소 3개의 안테나가 낙뢰판별에 참여해

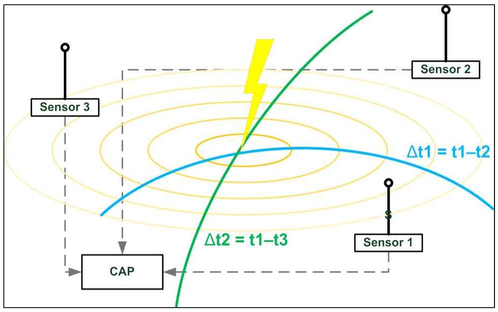

Fig. 2. Lightning detection algorithm by TOA difference.

야 한다. 즉, 낙뢰감지 알고리즘은 낙뢰 복귀 경로에서 각 감도 안테나까지의 신호 도착시간을 기준으로 거리를 추정하고 각 안테나에서 그 중심에 도달한 거리의 반지름을 가진 원을 생성하는 것이며 이 교차지점이 낙뢰가 발생하는 위치가 된다(Fig. 2).

2.1.2. 네트워크 구성

낙뢰감지안테나 주위에 강한 전파를 송신하는 장치가 존재하거나 아크용접과 같은 시설이 있는 지역에서는 전파간섭으로 인한 강한 노이즈가 발생되기 때문에 낙뢰감지사이트로 적합하지 않다. 따라서 설치 전 설치 후보지 주위의 지형과 전파 환경을 조사하는 것이 무엇보다 중요하다. 이러한 육안점검 및 전파환경 측정을 통하여 설치된 낙뢰감지사이트는 다음과 같다.

- 1st site = 나로우주센터
- 2nd site = 제주추적소(나로우주센터)
- 3rd site = 순천기상대(기상청)
- 4th site = 장흥 관측노장(기상청)
- 5th site = 진도 관측노장(기상청)
- 6th site = 고창 관측노장(기상청)

네트워크로 구성된 낙뢰감지시스템은 운대지방전(Cloud to Ground), 구름방전(Intra Cloud, Cloud to Cloud) 감지가 가능하여야 한다. 또한 운대지 방전의 경우에는 나로우주센터 반

Fig. 3. Lightning detection antenna (Jindo weather station)

Fig. 4. Lightning detection network of Naro space center.

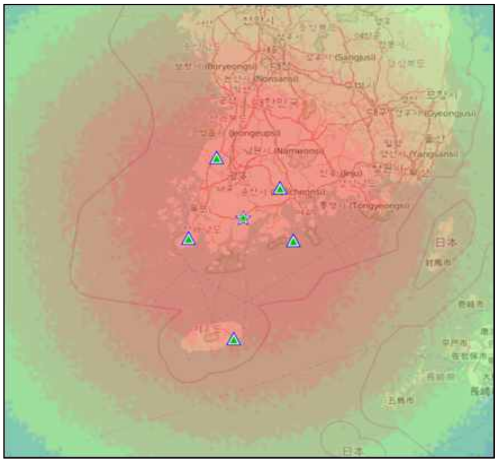

Fig. 5. Detection efficiency of lightning detection system

경 100 ㎞ 이내에서 90% 이상, 구름방전은 85% 이상 감지할 수 있어야 한다. 감지범위는 나로우주센터 반경 약 200 ㎞까지 감지가 가능해야 하며, 특히 30 ㎞ 반경 안에서는 250 m의 위치정확도를 가지고 있어야 한다.

낙뢰감지시스템의 설치 후에는 최적의 장비 상태를 유지하기 위해서는 실시간 탐지된 낙뢰 신호를 분석하고 교정하는 작업 및 각 사이트 별 설정된 이득값을 주기적으로 보정하는 최적화 작업을 수행하여야 한다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 센서 교정

낙뢰감지시스템의 센서 교정은 제조사에서 제공한 Sensor calibration tool을 사용한다. 신뢰도 있는 교정 값을 얻기 위해서는 최소 1000개 이상의 낙뢰신호가 각 센서별로 수집되어야 한다. 단, 센서 위치에서 500 ㎞ 이상 떨어진 지역에서 감지된 신호이거나 센서 교정을 진행하면서 설정된 지역은 센서 교정에 포함되지 않는다.

정극성(+) 신호는 부극성(-) 신호보다 굴절률이 커서 강한 전류 값을 가지고 있으므로 센서 교정을 진행할 경우에는 일반적으로 부극성(-) 신호를 사용하여 계산한다.

2.2.2. 시스템 최적화

낙뢰감지시스템 최적화의 목적은 센서의 감지효율을 극대화하기 위해서 진행되는 작업으로 다음의 2가지 요소들이 검토된다. 기본적으로 심한 낙뢰가 발생하는 날에는 시스템 최적화가 필요하다. 이는 각 센서에 대한 초당 Stroke 수를 계산하고 각 센서는 초당 Stroke 수를 모니터링 하여 모든 사이트에서 낙뢰신호 수를 균등하게 하는 것이다. 시스템 최적화를 위해서는 2가지 방법을 사용하는데, 첫 번째는 센서 이득 값의 조정을 통하여 시스템 최적화하는 방법이다. 낙뢰감지사이트는 최초 설치 시 사이트 환경조사(전파환경측정 포함)를 통해서 각 사이트 별 이득 값을 설정하게 되는데 각 사이트의 환경은 인근지역의 장애물, 신규 전파등록에 의하여 바뀔 수 있기 때문에 주기적으로 각 사이트의 스펙트럼 파형을 관찰하고 최적의 이득을 찾기 위해 1~16 사이의 이득 값을 조정하여 잡음 없는 조건으로 설정하는 것이다. 두 번째는 예상되는 낙뢰판별 파형 기준을 조정하는 방법이다. 낙뢰 판별 메커니즘은 낙뢰신호와 유사한 대역의 신호가 발생되었을 때 낙뢰를 판별할 수 있는 기준 값을 설정하는 것이다. 이 기준 값은 많은 문헌연구를 통해서 산출된 낙뢰신호 기준 값으로 전 세계 모든 낙뢰감지 시스템에서는 평균적으로 -110 dBm~-115 dBm의 값을 적용하고 있다. 단, 각 사이트의 환경에 따라 노이즈가 발생되는 구간이 겹치는 경우 평균적인 범위 내에서 낙뢰판별 기준 값을 -1 dBm 조정하는 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 센서교정

Table. 1은 2016년 5월부터 2018년 11월까지 낙뢰감지시스템 Sensor calibration tool을 이용하여 교정된 센서 민감도 값을 나타낸 것이다. 최초 2016년 5월 16일 6개의 낙뢰감지사이트의 민감도는 설치 시점에 제조사 기본값(40.000)으로 설정하였으며, 설치 이후 각 사이트별로 낙뢰발생횟수가 증가(Count ≥ 1,000)함에 따라 센서 교정 값이 산출되게 되며, 총 4회에 걸쳐 센서 민감도 교정이 진행되었다. 여기에서 특이할만한 점은 센서 민감도 값이 교정 전・후에 따라 큰 편차를 보였지만, 교전작업이 진행될수록 이전 센서 민감도 값과 생성된 센서 민감도 값의 편차가 점차 줄어들고 있는 것으로 보아 낙뢰감지 네트워크가 점차 안정되어 가고 있는 것으로 판단된다.

Table. 1. Difference of calibration value in each site (2016.05.16.~2018.11.20.)

Site	Calibration value of each site				
	2016.05.16.	2016.12.22.	2017.07.09.	2017.09.04.	2018.03.14.
Naro space center	40.000	57.291	76.894	59.428	73.539
Juju tracking center	40.000	60.690	No calibrated	61.082	84.279
Suncheon	40.000	142.556	198.952	174.817	190.278
Jindo	40.000	133.391	223.628	189.953	170.340
Jangheung	40.000	134.228	168.929	152.114	169.651
Gochang	40.000	77.068	134.204	92.662	120.295

Note: Only negative strokes used in calibration

3.2. 시스템 최적화

앞서 제시한 센서 이득 값 조정 방법과 낙뢰판별 파형 기준 조정 방법을 활용하여 나로우주센터 낙뢰감지시스템의 최적화 작업을 진행하였고, 2018년 3월 5일 Naro space center 사이트와 Jeju tracking station 사이트에서 스펙트럼 파형의 이상신호가 감지되어 이득 값이 조정되었다. 단, 각 낙뢰감지사이트 주변의 환경 변화와 시스템 노후화에 따라서 센서 이득 값은 달라질 수 있으므로 시스템 최적화 작업은 6개월에 한 번씩 수행되어져야 한다.

3.3. 관측자료 비교(with KMA)

기상청 낙뢰감지시스템은 2014년에 독일의 Nowcast社로부터 도입된 장비로, 하나의 센서로 대지방전과 구름방전을 모두 관측할 수 있다. 낙뢰감지원리는 나로우주센터와 마찬가지로 도달시간차(Time of arrival) 알고리즘을 사용하고 있으며, 전국적으로 총 21개의 낙뢰감지사이트를 하나의 낙뢰관측망으로 구성하여 실시간 운영 중에 있다. 관측된 자료를 통하여 낙뢰의 발생시각, 위치, 강도, 극성 등을 확인할 수 있으며, 낙뢰관측자료는 시각화되어 홈페이지와 모바일 웹 서비스를 통하여 국민에게 제공되고 있다.

3.3.1. No Calibration (2016.09.18)

나로우주센터 낙뢰감지시스템 도입 이후 초기 민감도 값(40.000)으로 설정된 후 2016년 9월 18일 관측된 낙뢰를 Fig. 6에 나타내었다. 기상청 자료와 비교해보면 나로우주센터 기준으로 남동쪽 지역은 낙뢰발생횟수의 차이가 심하게 나타나는데 이는 기상청 낙뢰감지시스템의 경우 전국 네트워크 망으로 구성되어 있어 모든 지역의 낙뢰감지효율이 높지만, 나로우주센터 낙뢰감지시스템의 경우 사이트 위치가 한반도 남서쪽에 집중되어 있으므로 나로우주센터 주변 및 남서부 지역의 감지효율만 높게 나타나기 때문이다(Fig. 5). 나로우주센터 인근지역의 위도 34.3도~34.6도, 경도 127.3도~127.6도 자료의 경우, 기상청 낙뢰자료는 204개의 낙뢰가 감지되었으나, 나로우주센터 낙뢰자료는 92개의 낙뢰가 감지되어 기상청 낙뢰감지시스템 대비 약 45% 정도 관측되는 현상이 확인되었다.

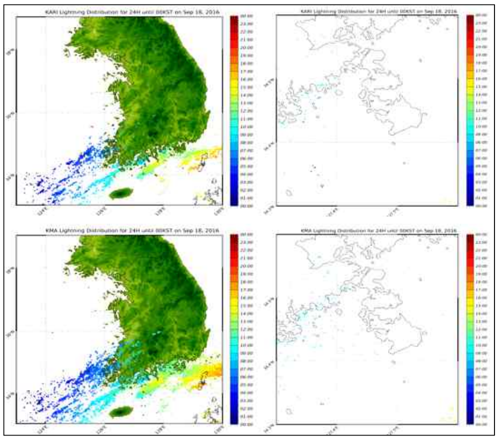

Fig. 6. Comparison of lightning data with KMA in case of No calibration (top KARI, bottom KMA).

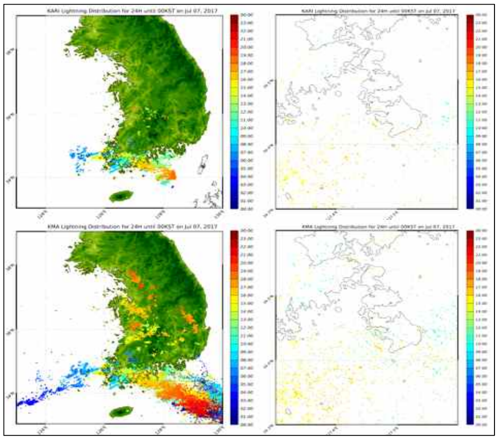

Fig. 7. Comparison of lightning data with KMA in case of 1st calibration (top KARI, bottom KMA).

3.3.2. 1st Calibration (2017.07.07)

2016년 12월 12일 첫 번째 교정작업이 수행된 후 2017년 7월 7일 관측된 낙뢰를 Fig. 7에 나타내었다. 교정작업이 진행되지 않았을 때의 값(40.000)과 비교하여 적게는 17.291(Naro space center), 많게는 102.556(Suncheon) 로 민감도가 변경되었다. 관측결과에서는 우주센터에서 서쪽으로 반경 200 ㎞ 이내와 동쪽으로 반경 100 ㎞ 이내의 관측 값은 기상청 낙뢰관측자료와 유사한 패턴을 보이지만, 그 이외의 지역에서는 나로우주센터 낙뢰감지시스템에서 낙뢰가 관측되지 않았다. 이 현상의 원인은 1st 교정작업을 진행하던 중 낙뢰탐지지역 설정 오류로 나타난 현상으로 2nd 교정작업 진행 시 수정되었다. 첫 번째 교정작업 이후 나로우주센터가 위치하고 있는 외나로도 지역의 경우, 기상청 낙뢰자료는 47개의 낙뢰가 감지되었으나, 나로우주센터 낙뢰자료는 25개의 낙뢰가 감지되어 기상청 낙뢰감지시스템 대비 약 53% 정도 관측되는 현상이 확인되었다.

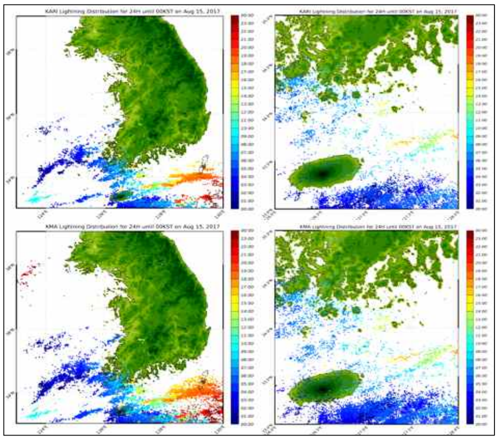

Fig. 8. Comparison of lightning data with KMA in case of 2nd calibration (top KARI, bottom KMA).

3.3.3. 2nd Calibration (2017.08.15)

2017년 7월 9일 두 번째 교정작업이 수행된 후 2017년 8월 15일 관측된 낙뢰를 Fig. 8에 나타내었다. 첫 번째 교정작업과 비교하여 Jeju 사이트를 제외한 나머지 사이트의 민감도 값이 변경되었으며, 적게는 19.603(Naro space center), 많게는 90.237(Jindo) 로 민감도가 변경되었다. w전체적인 낙뢰패턴은 기상청에서 감지한 낙뢰와 유사한 경향을 보였으나 전체 발생횟수에서는 기상청 자료보다는 적게 관측된 것을 확인할 수 있었다. 2017년 8월 15일의 경우 다수의 낙뢰가 남부지방에서 관측되었지만 나로우주센터 인근지역에

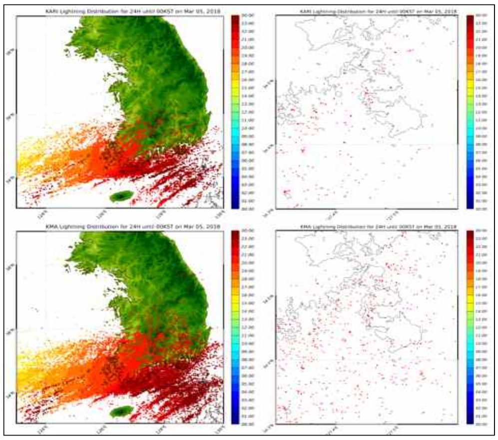

Fig. 9. Comparison of lightning data with KMA in case of 3rd calibration (top KARI, bottom KMA).

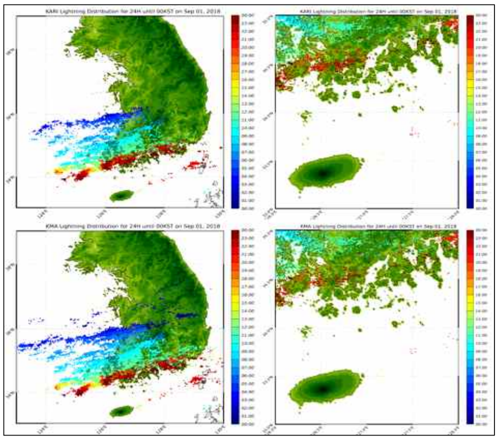

Fig. 10. Comparison of lightning data with KMA in case of 4th calibration (top KARI, bottom KMA).

서는 낙뢰가 관측되지 않았다. 따라서 제주도 지역의 낙뢰 발생횟수를 비교하여 교정작업에 따른 감지효율 개선여부를 확인하였다. 그 결과 기상청 낙뢰자료는 제주도 지역에 337개의 낙뢰가 감지되었으나, 나로우주센터 낙뢰자료는 120개의 낙뢰가 감지되어 기상청 낙뢰감지시스템 대비 약 35% 정도 관측되는 현상이 확인되었다. 이 값은 첫 번째 교정작업보다 떨어지는 것으로 기상청 낙뢰 발생은 제주도 전체적으로 분포하고 있는 반면에 나로우주센터 낙뢰는 세부한라산 남쪽지역에서 낙뢰를 관측하지 않았다. 이 현상은 Jeju 사이트가 두 번째 교정작업에 포함되지 않았던 것과 연관이 있는 것으로 판단된다.

3.3.4. 3rd Calibration (2017.09.04)

2017년 9월 4일 세 번째 교정작업이 수행된 후 2018년 3월 5일 관측된 낙뢰를 Fig. 9에 나타내었다. 두 번째 교정작업 (Jeju 사이트는 첫 번째 교정작업)과 비교하여 적게는 0.392 (Jeju), 많게는 41.542(Gochang)로 민감도가 변경되어 교정작업을 진행할수록 민감도 편차가 점차 줄어들고 있음을 확인하였다. 또한 세 번째 교정작업 후에도 전체적인 낙뢰패턴은 기상청에서 감지한 낙뢰와 유사한 경향을 보이고 있었으며, 나로우주센터가 위치하고 있는 외나로도 지역의 경우, 기상청 낙뢰자료는 20개의 낙뢰가 감지되었으나, 나로우주센터 낙뢰자료는 9개의 낙뢰가 감지되어 기상청 낙뢰감지시스템 대비 약 45% 정도 관측되는 현상이 확인되었다.

3.3.5. 4th Calibration (2018.03.14)

2018년 3월 14일 네 번째 교정작업이 수행된 후 2018년 9월 1일 관측된 낙뢰를 Fig. 10에 나타내었다. 전체적인 낙뢰패턴은 기상청에서 감지한 낙뢰와 유사한 경향을 보이고 있었으며, 세 번째 교정작업과 비교하여 적게는 14.111(Naro space center), 많게는 27.633 (Gochang) 로 민감도가 변경되어 교정작업을 진행할수록 민감도 편차의 폭이 6개 사이트 모두 30.000 미만의 값을 나타내어 시스템이 안정적으로 운용되고 있음을 확인하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 낙뢰감지안테나가 설치되어 있는 남서부 지역과 먼 곳에서는 낙뢰발생횟수가 기상청 낙뢰자료에 비하여 여전히 적게 나타나고 있으나, 남서부 지역에서는 나로우주센터 낙뢰발생횟수가 기상청과 유사한 갯수를 나타내고 있다. 특히 고흥지역의 경우, 기상청 낙뢰자료는 33개의 낙뢰가

감지되었으나, 나로우주센터 낙뢰자료는 32개의 낙뢰가 감지되어 기상청 낙뢰감지시스템과 거의 일치한 낙뢰발생횟수를 나타내고 있다.

4. 결 론

나로우주센터에서 운용 중인 낙뢰감지시스템의 최적화 방안을 연구하기 위해서 센서 교정 및 시스템 최적화 작업을 진행하였고, 기상청 낙뢰감지시스템 관측자료와의 낙뢰발생횟수 비교검증을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 2016년 5월부터 2018년 11월까지 낙뢰감지시스템 Sensor calibration tool을 이용하여 총 4회에 걸쳐 센서 민감도 값을 교정하였으며, 교정작업을 진행할수록 센서 민감도 값의 편차가 줄어들고 있음을 확인할 수 있었다.

2) 낙뢰 판별 메커니즘을 통하여 낙뢰신호가 발생되었을 때 낙뢰를 판별할 수 있는 기준 값을 설정할 수 있는데 2018년 3월 5일 Naro space center 사이트와 Jeju tracking station 사이트에서 스펙트럼 파형의 이상신호가 감지되어 이득 값이 조정되었다.

3) 기상청 자료와 낙뢰발생횟수를 비교해보면 나로우주센터를 기준으로 남동쪽 지역은 적은 개수의 낙뢰를 확인할 수 있다. 기상청 낙뢰감지시스템의 경우 전국 네트워크 망으로 구성되어 있어 한반도 전 지역의 낙뢰감지범위를 가지지만, 나로우주센터 낙뢰감지시스템의 경우에는 낙뢰사이트가 한반도 남서쪽에 설치되어 있어 나로우주센터 주변 및 남서부 지역의 감지효율만 높게 나타난다.

4) 기상청 낙뢰관측자료 대비 낙뢰발생횟수의 분포는 센서 교정작업을 진행할수록 높아지고 있다. 물론 6개의 낙뢰사이트가 지속적으로 동작해야 하겠지만, 네 번째 교정작업이 수행(2018년 3월 14일)된 후에는 한반도 남서부 지역에서 나로우주센터 낙뢰발생횟수가 기상청과 유사한 개수를 나타내고 있으므로 나로우주센터 낙뢰감지시스템은 안정화되었다고 판단된다.

5) 나로우주센터 낙뢰감지시스템의 감지효율 및 위치정확도를 더욱 향상시키기 위해서는 지속적으로 센서 교정작업 및 시스템 최적화를 진행해야 할 것이고, 낙뢰 관측원리(Time of arrival)를 고려한다면 전남 화순 또는 제주도 서부지역에 추가적인 낙뢰 사이트를 구축하는 것도 하나의 방법으로 고려할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 대한민국 정부의 우주센터 2단계 사업에 의해 수행된 연구입니다.

References

1. Kenneth L. Cummins, Martin J. Murphy, Edward A. Bardo, William L. Hiscox, Richard B. Pyle, Alburt E. Pifer : “A combined TOA /MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network”, Journal of Geophysical Research, Vol 103, No. D8, Pages 9035-9044, April 27, 1998
2. 기상청(2018), 관측업무, 낙뢰관측장비의 과거, 현재 그리고 미래
3. University of Waikato(2014), Lightning formation(a spark discharge between centres of positive and negative discharge)
4. TOA systems Inc. USA(2016), Lightning detection algorithm by TOA difference
5. 김홍일, 최용태, 한유수, 문병진, 송하룡, 하종성, 최은호(2017), 무선측위기법(TOA)을 이용한 낙뢰신호의 검출 및 위치분석을 위한 수신부 개발, 중소기업지원과제 연구보고서, pp. 8~9