

# 낙뢰측정 네트워크(KLDNet)를 위한 감지기 사이트서베이와 낙뢰 감지율 검토

論 文

55C-11-5

## A study on the Site Survey and Detection Efficiency for Kepco Lightning Detection and Information Network

禹 貞 旭<sup>†</sup> · 郭 周 植<sup>\*</sup> · 文 在 德<sup>\*\*</sup>  
(J. W. Woo · J. S. Kwak · J. D. Moon)

**Abstract** - Lightning induced faults accounts for more than 66% at the transmission lines of KEPCO. The lightning causes damages to power system equipments including transmission line, the blackout of electricity and the electro-magnetic interference. Because of this reason, we need the real time lightning information for the optimal operation of power system. And, it is required to obtain and accumulate the lightning current parameters for the insulation design. In 2005, KEPRI constructed a lightning detection network, the KLDNet (i.e. Kepco Lightning Detection & Information System) and launched a lightning information service for KEPCO customers. It is intended to provide data service on the operation of transmission lines and collect lightning-related data, which is the most important factor regulating power system design and operation. The new system will replace LPATS, the old detection system, which has been operating since 1995 and is rapidly failing in terms of both detection performance and location accuracy. The purpose of this paper is to explain the work performed and the results of that work in performing a site survey of several locations. The purpose of the site survey is to find locations acceptable for the installation of a lightning location receiver in support of a Lightning detection system(LDS). A restriction was placed on the surveyed locations, as they must belong to the Korea Electric Power Company. This requirement was made to facilitate the communication needs of the LDS network. Total of 15 sites were evaluated as possible LDS sensor sites. Some of the sites were rejected for physical reasons and therefore no electrical testing was performed. Of the 15 sites, total of 10 sites were considered acceptable and 5 sites were rejected for various reason. In this paper, we would like to explain the site survey and detection efficiency for LDS.

**Key Words** : lightning, transmission lines, power system, real time, LPATS, TDOA, site survey, detection efficiency

### 1. 서 론

한국전력공사는 발전소에서 생산된 전력을 소비자에게 전달하는 네트워크의 운영을 담당하고 있다. 이러한 전력수송망의 고장이나 이상동작은 즉각적으로 엄청난 영향을 전력 소비자 및 생산자 모두에게 끼치고 있다. 특히 여름에 발생이 활발해지는 낙뢰에 의하여 가장 큰 영향을 받고 있다. 통계에 따르면 매년 낙뢰로 인해 발생하는 송전고장은 전체의 66% 이상을 차지할 정도이다[1]. 이처럼 낙뢰는 전력회사에서 매우 관심 있게 다루고 있는 대상이다.

대개의 경우 낙뢰에 의한 영향은 일시적으로 나타났다가 제거되지만 송전설비에 물리적 손상을 입히는 경우 가급적 빠른 시간 내에 복구되어야 하며, 신속한 복구를 위해서는 낙뢰유발 고장위치의 빠른 확인이 필수적이다.

한편 낙뢰의 발생 지역과 뇌격전류의 크기에 대한 증장기

측정 데이터로부터 전력설비에 대한 내뢰설계를 도출할 필요성이 있다[2][3]. 이를 위해서 한전에서는 1995년부터 낙뢰 위치 표정시스템(LPATS : Lightning Positioning & Tracking System)을 운영하여 왔으며 2005년에 성능이 개선된 한전 낙뢰감지 네트워크(KLDNet : Kepco Lightning Detection & Information Network)를 설치하고 운영을 시작하였다[4].

본 논문에서는 이 새로운 한전 낙뢰감지 네트워크의 낙뢰 감지기 위치선정을 위한 연구결과와 선정된 낙뢰감지기 위치에 따른 낙뢰 감지율과 위치 정확도에 대해 시뮬레이션한 결과에 대해 설명하고자 한다.

### 2. 한전 낙뢰감지 네트워크(KLDNet)의 구성

낙뢰감지 네트워크는 그림 1과 같이 8개의 낙뢰 감지기로 구성되며, 이들 감지기에 낙뢰신호가 도달하는 시간 차이를 이용하여 낙뢰의 발생위치와 뇌격전류의 크기 등을 계산하는 도달시간차(TDOA : Time Difference of Arrival) 방식이 사용되며, 시스템의 각 감지기 위치가 최적화가 가능하도록 각 감지기별로는 삼각배열이 되게 설계하였다[5][6]. 인접 감지기간 거리(베이스 라인)는 최소 100 km에서 최대 210 km를 유지 가능하도록 하였으며 그 위치정보를 표 1에 나타내었다.

<sup>†</sup> 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院  
E-mail : jwwoo@kepri.re.kr

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院

<sup>\*\*</sup> 正 會 員 : 慶 北 大 學 校 電 子 電 氣 計 算 機 學 部

接 受 日 字 : 2006 年 8 月 11 日

最 終 完 了 : 2006 年 9 月 14 日

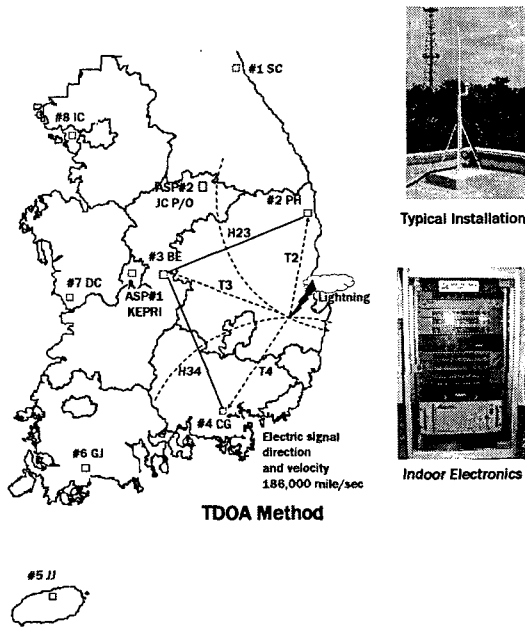


그림 1 낙뢰감지기 위치 및 도달시간차 방법  
 Fig. 1 Location of lightning detection sensors and TDOA method

표 1 낙뢰감지기 설치 위치 정보  
 Table 1 Location Information of Lightning Detection Sensors

위치	위도	경도
#1 SC (속초)	38.185	128.560
#2 PH (평해)	36.705	129.442
#3 BE (보은)	36.424	127.730
#4 CG (창공)	35.223	128.656
#5 JJ (제주)	33.494	126.534
#6 GJ (강진)	34.731	126.699
#7 DC (대천)	36.306	126.604
#8 IC (인천)	37.486	126.691

표 2 낙뢰감지기 특성.  
 Table 2 Characteristics of Lightning Detection Sensors.

관측낙뢰 형태	운대지간 및 운간 방전(전계)
설계 위치정확도	< 250 m 최소
감지율	> 95 % 운대지간 > 90 % 운간
베이스 라인	20~400 km
설치위치 최소조건	타워나 건물의 옥상
감지기 관측 대역	1.5 ~ 400 kHz
감지시기 시간 정확도	GPS/UTC (1 σ) 15 ns 이내
감지기 재동작 시간	100 μs

그림 1에서와 같이 특정한 지점에서 낙뢰가 발생하면 이때 발생한 신호들이 각 감지기(예: #2, #3, #4)에는 T1, T2,

T3의 시간 후에 도달하게 된다. 도달하는 시간의 차이에 의해 쌍곡선 커브 H23, H34를 계산하며, 쌍곡선 커브가 교차하는 지점이 송신원(낙뢰의 위치)이 되어 최종 위치를 결정하게 된다. 원리상 단지 세 개의 감지기만이 쌍곡선 계산을 위해 필요하지만, #2, #3, #4가 아닌 다른 감지기에서도 동일 조건의 낙뢰가 감지되어야만 낙뢰로 판정되도록 하고, 또한 이 정보를 이용하여 위치 오차도 보정하게 하여 위치 정확도와 감지율의 성능이 향상되도록 설계하였다. 낙뢰감지기는 일반적으로 빌딩 옥상의 한쪽 구석에 위치하게 되며, GPS 안테나도 가능한 한 낙뢰안테나와 가장 인접해서 설치하고, 설계된 시스템에서 GPS 안테나의 연결 케이블은 8개소 감지기 장소에서의 조건을 동일하게 하기 위하여 30 m로 고정하였다.

표 2는 낙뢰감지기의 기본 특성표이다. 사용된 낙뢰감지기의 베이스라인은 400 km 이내가 최적이며, 측정되는 신호의 주파수대역은 1.5~400 kHz이다. 이 낙뢰감지기들에 의해 수신된 낙뢰신호는 네트워크를 통해 중앙분석장치로 전송하며, 이때의 데이터는 바이너리 형태이다. 낙뢰감지기내에서는 GPS와 연동된 정확한 수신시간을 기록할 뿐 만 아니라 파형들의 상승시간, 하강시간, 진폭 등과 같은 정보를 기록하며, 필요한 파형을 디지털화 하는 기능들이 있다. 시스템의 시간측정 성능은 낙뢰의 위치 정확도에 결정적인 영향을 끼치게 되며, 모든 낙뢰감지기는 100 ns의 분해능을 갖는 GPS 수신기를 사용하고 있다.

### 3. 사이트서베이 결과

#### 3.1 접지상태에 따른 영향 검토

낙뢰에 의해 전자계 파형이 방사되면, 낙뢰감지기는 전계 신호를 관측하게 된다. 이때 감지기에 관측되는 신호는 감지기와 외함의 접지상태에 따라 많은 영향을 받기 때문에 모든 감지기 사이트들의 접지상태가 양호하여야 한다. 그러나 대부분의 후보지 옥상에는 적절한 접지대책이 마련되어 있지 못하였으며, 창공의 경우만 건물자체가 철골구조이어서 접지상태가 양호한 편이었다. 이런 경우는 실질적으로는 설치 후보지로는 좋은 곳이나, 사이트 서베이를 하는 다른 곳과의 접지상태 비교를 위해 접지가 다른 조건과 비슷한 경우도 상정하여 검토하였다.

그림 2는 실제로 낙뢰 발생이 없는 조건에서 낙뢰감지기의 접지상태가 좋지 않은 경우의 측정결과이다. 그래프에서 위쪽에 나타난 파형(A1)은 안테나에서 직접 관측된 파형이고, 아래 파형(A2)은 안테나에서 얻어진 파형이 고주파 필터를 통과한 후의 파형이다. 그림에서 보듯이 필터를 통과한 이후에도 노이즈가 거의 동일하게 나타나고 있어, 필터에 의해 제거되는 노이즈 영역 외의 노이즈가 존재하여 후보지 조건으로는 부적합한 경우이다.

반면, 동일한 곳에서 감지기의 접지상태를 양호하게 하고 관측한 결과가 그림 3이다. 역시 위의 파형(A1)이 안테나 바로 후단의 결과이며, 아래 파형(A2)이 필터를 통과한 후의 파형이다. 이 경우에는 필터를 통과하기 이전에 이미 양호한 노이즈 레벨을 보여주고 있다. 따라서 동일한 지점에서 접지상태의 조건에 따라 관측되는 노이즈 결과가 틀려짐을 알 수 있으며, 최종 후보지 선정시에는 해당 변전소별 접지상태 등도 고려되었다.

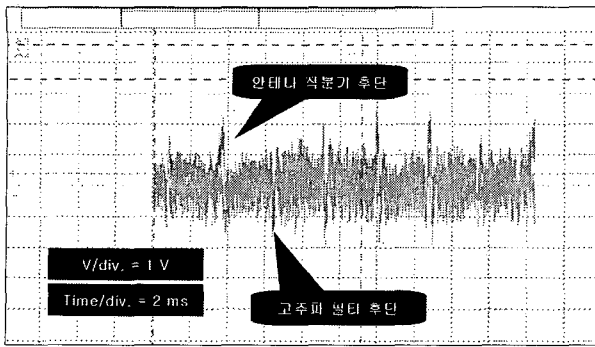


그림 2 노이즈 측정 결과 (접지 상태 불량)  
Fig. 2 Noise signal when the earthing condition is poor.

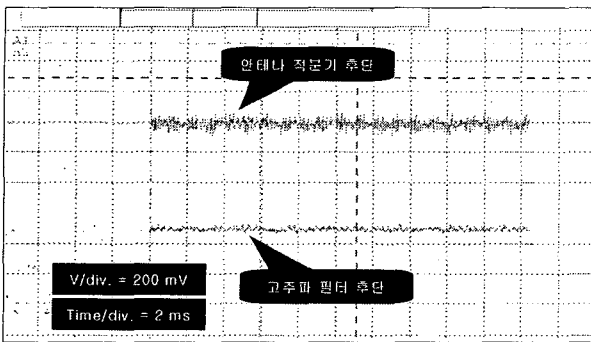


그림 3 노이즈 측정 결과 (접지 상태 양호)  
Fig. 3 Noise signal when the earthing condition is good.

### 3.2 사이트 노이즈 검토 결과

그림 4는 최종 낙뢰감지기 설치장소로 선정된 곳에서 사이트 서베이한 결과의 예로서, 345 kV 변전소내의 본관동에서 관측된 것이다. 건물은 2층 구조로 옥상에 접근이 용이하게 되어 있으며, 옥상의 금속판으로 말미암아 접지상태가 양호하였다. 그래프 위쪽의 파형(A1)은 정상적인 상태에서 관측된 결과로 AM 송신영역의 주파수대에서 관측된 상당한 크기의 노이즈이었다. 따라서, 관측 후 낙뢰감지기에 해당 주파수대의 필터를 설계하여 설치한 후, 그림 4에서 아래쪽 파형(A2)과 같이 노이즈가 제거된 아주 양호한 상태의 파형을 관측할 수 있게 되었다.

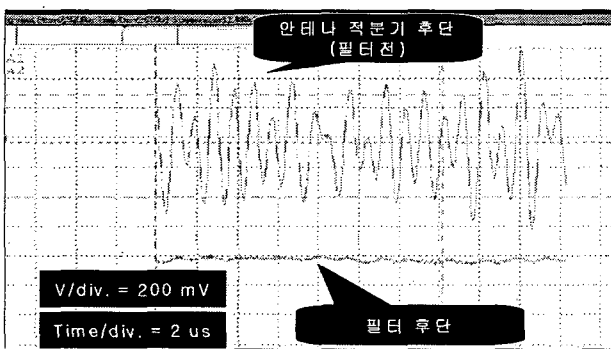


그림 4 AM 송신영역 주파수대의 노이즈 (후보지 A)  
Fig. 4 Substantial Interference of a Frequency in the AM Transmission Band (Site A)

반면 그림 5는 낙뢰감지기 설치장소로 선정되지 못한 154 kV 옥외 철구형 변전소내의 본관동에서 관측된 결과 예이다. 감지기가 설치 가능한 건물 옥상에 접근은 용이하나, 옥상에서의 양호한 접지상태를 얻지 못하여, 대지까지 접지선을 연결하여 측정하였다. 그래프 위쪽의 신호(A1)는 정상적인 상태에서 관측된 파형으로 상당한 크기의 노이즈가 있다. 관측 후 그림 4에서와 동일한 조건의 필터를 설치한 후에 관측된 파형이 아래쪽 파형(A2)으로 일부 노이즈는 제거되었지만 그 지역에서만 나타나는 주파수 영역의 노이즈가 제거되지 못하였다.

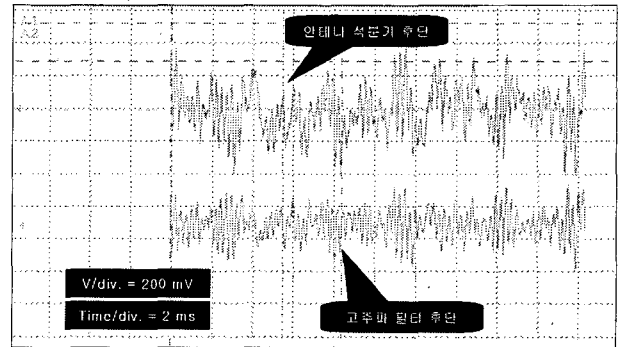


그림 5 관측된 노이즈 (후보지 B)  
Fig. 5 Substantial Interference (Site B)

그림 6과 7은 그림 4의 그래프를 푸리에 변환(FFT)한 주파수 스펙트럼 그래프이다. 그림 6은 최초의 파형(그림 4의 A1)에서 얻어진 결과이며, 그림 7은 필터를 추가한 후의 파형(그림 4의 A2)을 푸리에 변환한 파형이다. 그림 6에서 보면 AM 송신영역에서 적어도 다섯 개 이상의 간섭신호가 나타난다. 이러한 노이즈를 필터에 의해 제거시킨 후 얻어진 파형이 그림 7이다. 그림 6과 7을 비교하면 저주파수대의 노이즈는 그 크기가 감소되었으며, 고주파수 영역에서의 노이즈는 거의 제거되었다. 따라서, 노이즈를 제거한 후의 파형이 그림 4의 아래 그래프(A2)로 낙뢰감지기 설치장소로 적합한 정도의 노이즈 레벨이다.

사이트 서베이는 총 15개의 사이트를 조사하고 각 후보사이트별 노이즈 크기 정도와 주파수 분석을 통하여 후보지로 적합한 장소는 10개 지역이었다. 최종 필요로 하는 후보지는 8개소로 적용되는 필터가 동일한 조건에서 최적의 데이터 확보가 가능하고, 외관의 상태, 다음에서 언급될 감지율과 위치 정확도 등을 고려하여 최종 8개소를 후보지로 선정하였다.

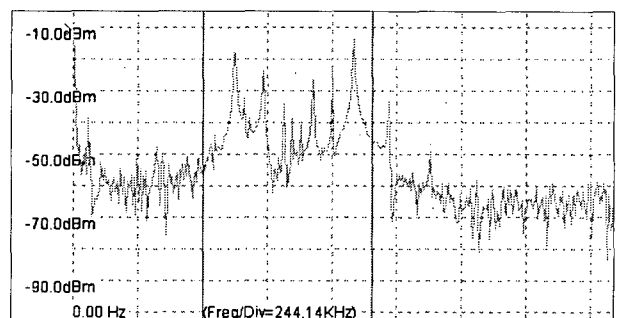


그림 6 노이즈 신호의 주파수 스펙트럼  
Fig. 6 Frequency Spectrum of the Noise Signal

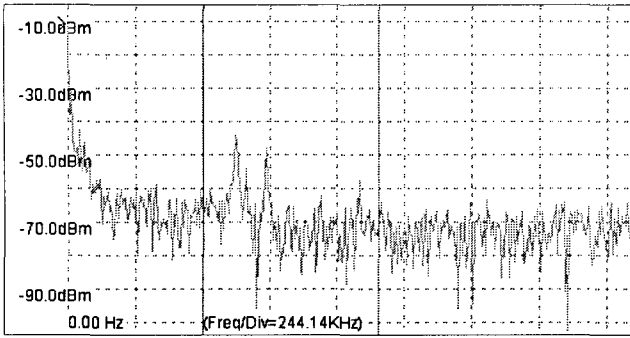


그림 7 필터에 의해 제거된 신호  
Fig. 7 Removed Signal by the Filters

#### 4. 낙뢰 감지율과 위치 정확도에 대한 검토결과

낙뢰감지기의 설치위치를 확정하기 위하여, 설계된 신규 낙뢰감지 시스템에 대한 낙뢰 감지율과 위치 정확도에 대한 시뮬레이션을 시행하였다. 각 감지기의 관측영역이 500 km 정도로 한반도 밖의 영역도 관측하지만, 주요 관심 대상이 한반도내임으로, 시뮬레이션에서는 한반도 지역으로 국한하여 위도 33도, 경도 124도에서 위도 40도, 경도 131도까지의 범위에 대해 검토하였다.

낙뢰에 대한 송변전설비의 절연설계시에는 뇌격전류에 대한 누적확률분포가 사용된다. 누적확률분포는 제안자에 따라 여러 가지가 사용되고 있고, 전력연구원에서는 과거 10년 동안 낙뢰위치표정시스템에 의해 관측된 결과치가 있다.

일반적으로 누적확률(P)은 식 (1)과 같이 누적분포의 중간값(M)과 누적지수(n)로 표현한다[3]. 즉, 낙뢰의 최대전류값(I)보다 더 큰 최대 전류를 가질 수 있는 가능성을 확률값으로 보여주는 것이다. 이때 전류크기값의 단위는 kA이다. 식 (2)와 (3)은 CIGRE 및 IEEE 등에서 가장 많이 적용하고 있는 Anderson-Eriksson과 Popolansky가 제안한 식이며, 식 (4)는 전력연구원에서 낙뢰위치표정시스템에 의해 관측된 결과를 이용하여 얻어진 결과이다[5].

$$\text{누적확률 분포} : P = \frac{1}{1 + (I/M)^n} \quad (1)$$

$$\text{Anderson-Eriksson} : P = \frac{1}{1 + (I/31)^{2.6}} \quad (2)$$

$$\text{Popolansky} : P = \frac{1}{1 + (I/25)^{2.0}} \quad (3)$$

$$\text{KEPRI 1996 - 2005} : P = \frac{1}{1 + (I/17.51)^{2.86}} \quad (4)$$

이들 식을 그래프로 표현한 것이 그림 8이다. 식과 그림에서 보듯이 중간값은 Anderson-Eriksson식이나 Popolansky식과 비교하여 전력연구원 데이터가 다소 적은 값으로 지역별 특성이나 측정방법이 다르므로 나타나는 차이로 이해할 수 있으며, 전체적으로 전력연구원 뇌격전류의 크기가 다른 나라에 비해 적음을 알 수 있고, 그래프의 기울기는 Anderson-Eriksson 식과 상당히 근접한 값을 보여주고 있다.

영역내의 각 지점에서 발생하는 낙뢰 모델에 의해 만들어진 임의의 100개 가상낙뢰 샘플에 의해 시스템의 낙뢰 감지

율과 위치 정확도에 대하여 계산하였다. 실제 모델링시에는 앞에서 설명되었듯이 제안자에 따른 여러 누적확률분포와 전력연구원에서 얻어진 결과치가 있지만 데이터의 년도별 편차 등을 고려하고, CIGRE 및 IEEE 등에서 대표적으로 사용되는 수식인 Anderson과 Eriksson에 의해 제안된 뇌격전류의 누적확률분포를 기초로 하였다[3][5]. 사용된 낙뢰 모델은 누적확률분포식에 의해 무작위로 발생되어진다.

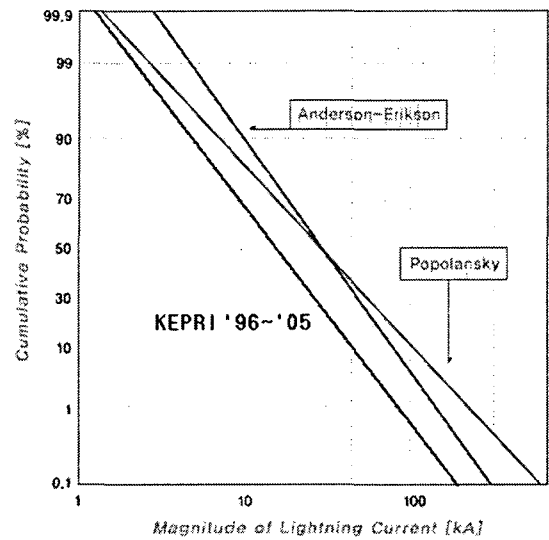


그림 8 뇌격전류 누적확률분포  
Fig. 8 Cumulative Probability Distribution of Lightning Current

시뮬레이션 내에서 감지기 모델은 어떤 감지기가 특정의 가상 낙뢰를 검출하는가를 결정한다. 감지기의 A/D 변환기에 측정된 전압이 기 프로그램화 되어 있는 기준 전압을 초과할 때 낙뢰로 검출한다. 낙뢰 발생 최대 전류치, 발생점으로부터 감지기까지의 거리, 감지기 이득, 그리고 전파 방향의 대지도전율이 A/D 변환기에서 측정된 값의 크기를 결정하는 요소가 된다. 감지기에서 낙뢰로 검출되어지면, 도달시간차 방식에 의해 감지기 위치와 시뮬레이션 되어 생성된 낙뢰 위치 사이의 거리를 계산하게 된다.

기본적인 감지기 주변의 잡음은 과거 10여년 동안 운용되어 현재 사용 중인 낙뢰위치표정시스템의 감지기에서 기 얻어져 있는 실측 데이터를 이용하여 도달시간에 더해져서 계산되었다. 중앙 처리기 모델에서 수행되는 내용은 각 감지기 사이트 중 세 개의 감지기에 의해 시뮬레이션 되어진 낙뢰가 선택되고, 각 사이트에서 결정되어진 시간을 이용하여 낙뢰의 위치를 결정하였다. 중앙 처리기에 사용된 실제 코드는 시뮬레이션에 사용되는 모델이 그대로 사용되었다.

감지율은 특정 지역에서 발생한 낙뢰에 대해 적어도 세 개의 감지기에서 검출되어지는 확률에 의해 정의되어진다. 그림 9는 설계된 시스템의 한반도내에서의 감지율에 대해 시뮬레이션 한 결과이다. 각각의 위도와 경도에서 감지율은 그림의 오른쪽에 있는 기준 막대그래프에 의해 정의된 색으로 표시되었다. 이 막대그래프는 0~100 %의 가능성을 의미한다. 시뮬레이션 결과에 의하면, 표 2에 설명된 것과 같이 한반도내에서의 감지율은 95 % 이상으로 나타났다.

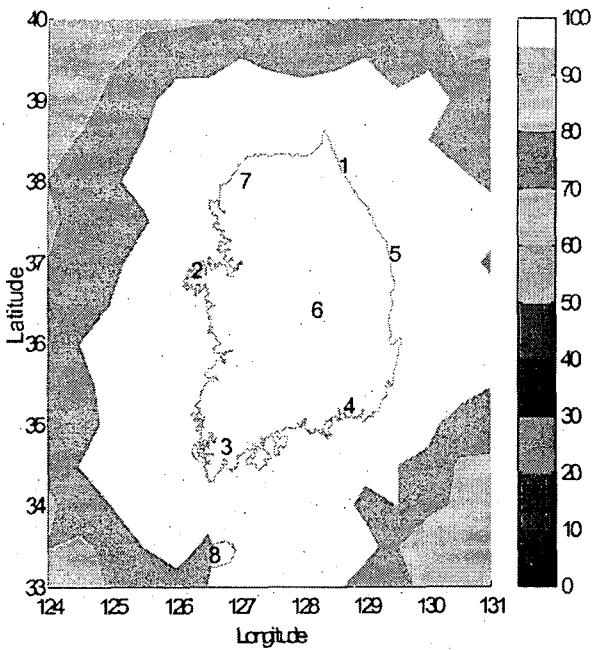


그림 9 낙뢰모델을 이용한 감지율 검토결과  
Fig. 9 Detection Efficiency using Lightning Model

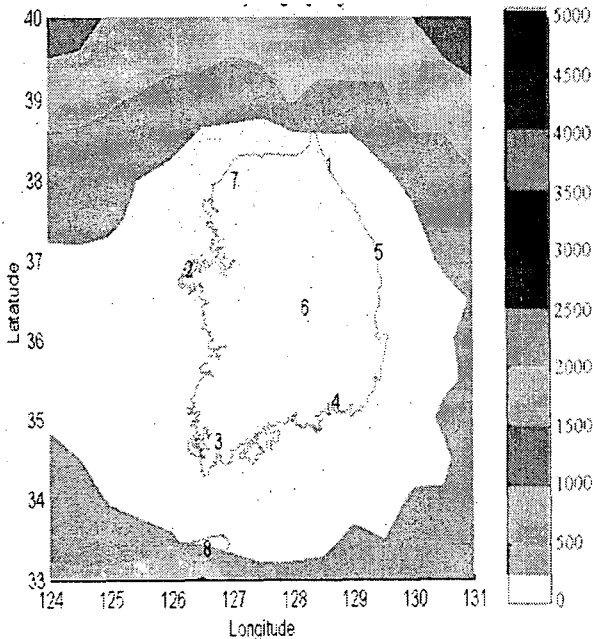


그림 10 낙뢰모델을 이용한 위치정밀도 검토결과.  
Fig. 10 Location Accuracy using Lightning Model.

위치 정확도는 각 지점에서 100개의 낙뢰에 의해 산출되어진 거리 오차의 평균값에 의해 정의 되어진다. 그림 10은 한반도내 낙뢰감지시스템의 위치 정확도를 예상한 것이다. 각각의 위도와 경도에서 위치 정확도는 그림의 오른쪽에 있는 기준 막대 그래프에 의해 정의된 색으로 표시되었다. 이 막대그래프는 각 지점의 거리 오차를 미터 단위로 표시한 것이다. 역시 시뮬레이션 결과에 의하면 한반도내에서의 위치 정확도는 250 m 이내를 예상할 수 있어 송전선로의 한

경간 거리를 감안하면 낙뢰사고의 위치확인에 결정적인 단서가 될 수 있을 것이라 판단한다.

### 3. 결 론

한국전력공사에서는 전력설비의 낙뢰고장에 신속히 대처하고, 최적의 내뢰설계를 위하여 새로운 낙뢰측정시스템을 설계하였다. 새로운 낙뢰측정시스템인 한전 낙뢰감지 네트워크(KLDNet)는 8개의 낙뢰감지기로 구성되어 있으며, 본 논문에서는 설계된 낙뢰감지기의 위치선정에 필요한 사이트 서베이와 낙뢰 감지율과 위치 정확도에 대해 시뮬레이션한 결과에 대해 아래와 같이 설명하였다.

- 발생한 낙뢰 신호들이 각 감지기 도달하는 시간의 차이에 의해 송신원(낙뢰의 위치)의 위치를 추정하는 시스템을 설계하였다.
- 감지기에 관측되는 신호는 감지기의 접지상태에 따라 많은 기본 파형이 영향을 받기 때문에 모든 감지기 설치위치 후보지에서의 접지상태 및 접지의 영향에 따른 파형을 분석하였다.
- 사이트 서베이는 총 15개의 사이트를 조사하고 각 후보사이트별 노이즈 크기 정도와 주파수 분석을 통하여 최종 후보지를 선택하였다.
- 설계된 신규 낙뢰감지 시스템에 대한 낙뢰 감지율과 위치 정확도에 대한 시뮬레이션을 시행하여 한반도내에서의 감지율은 95 % 이상, 위치 정확도는 250 m 이내를 예상할 수 있었다.

앞으로 이 시스템에서 제공되는 낙뢰정보는 고장발생사 신속한 복구 등 송전선로의 운영에 도움을 줄 것으로 예상되며 장기적으로 축적된 데이터는 전력설비의 신뢰도 제고를 위한 설계 자료로 활용이 기대되고 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 심응보, 우정욱, 강연욱, 박주식, 권동진, “절연설계 신뢰도 향상을 위한 뇌격전류 직접측정 설비 구축에 관한 연구”, 2005. 11.
- [2] Takatoshi Shindo, “Lightning location systems in Japan and a lightning frequency map using the data obtained by them”, 10th ISH, 1997. 8
- [3] CRIEPI, “Guide to Lightning Protection Design of Power Stations, Substations and Underground Transmission Lines”, T40, pp. 31~53, 1995. 7.
- [4] 박주식, 우정욱, 추진부, 이복희, 장성익, 문재덕, “The Site Survey Results for New Lightning Detection System of KEPCO”, Korea-Japan Symposium Joint Symposium on electrical Discharge and High Voltage Engineering, 2005.
- [5] 우정욱, 박주식, 강연욱, 김현주, “The Introduction about New KLDNet and the Statistical Distribution of Lightning Parameters in Korea”, International Lightning Detection Conference, 2006.

- [6] "KEPRI Site Survey Final Report", TOA Systems Inc., May, 2005
- [7] KEPCO, "A Research For Construction of Lightning Position and Tracking System and for Power System Application (Final Report)", pp. 55~90, 1995. 6.

## 저 자 소 개



### 우 정 옥(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 : jwwoo@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(공학). 1982년 동경대 전기공학과 졸업(공학). 1983년~현재 경북대 전자전기컴퓨터공학부 교수

Tel : 053-950-5601

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr