

## 낙뢰와 대기전계의 탐지를 기반으로 하는 자동낙뢰경보시스템의 구성과 운용특성

(Construction and Operation Characteristics of the Automated Lightning Warning System  
Based on Detections of Cloud-to-Ground Discharge and Atmospheric Electric Field)

심해섭\* · 이복희\*\*

(Hae-Sup Shim · Bok-Hee Lee)

### Abstract

It is important to give lightning warning prior to a cloud-to-ground (CG) discharge within an Area of Concern (AOC) because most of lightning damage and victim are usually occurred by the first lightning in the AOC. The aim of this study is to find the optimal operation conditions of the automated lightning warning systems in order to make the best use of the available data. In this paper, the test-operated results of the automated lightning alert and risk management system (ALARM) based on detections of CG discharge and electrostatic field and optimized at probability of lightning have been described. It was possible to obtain the following warning performance parameters: probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR), probability of lightning (POL) and failure-to-warn rate (FTW). The data obtained from trial operation for 5months were not sufficient but the first analysis of domestic lightning warning was carried out. We have observed that the evaluated statistical results through trial operation depend on the various factors such as analysis methods and criteria, topographical conditions, etc. Also we suggest some methods for improvement of POL and POD including the finding of the optimal electric field threshold level to be used, based on the high values of FAR and FTW found in this work.

Key Words : Lightning, Lightning Warning, Probability of Detection, Probability of Lightning,  
False Alarm Ratio, Failure-to-Warn Rate

\* 주저자 : 기상청 국가기상위성센터 위성기획과  
\*\* 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
\* Main author : National Meteorological Satellite  
Center  
\*\* Corresponding author : School of Electrical  
Engineering, Inha University, Professor  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2013년 9월 24일  
1차심사 : 2013년 9월 28일  
심사완료 : 2013년 10월 22일

### 1. 서 론

뇌관측 기술의 발전에 따라 낙뢰발생에 대한 예측기  
법의 활용 및 예방대책기술의 진전으로 낙뢰에 의한  
피해는 상당히 감소한 것으로 보고되었다[1-3]. AOC  
(관심지역: area of concern)내에서 최초의 CG(낙뢰:

cloud-to-ground discharge)가 발생하기 전에 사전낙뢰경보를 촉발하는 것은 인명과 재산의 보호를 위한 매우 중요하고 효과적인 예방대책이다. CG로 인한 피해의 절반 이상은 AOC내에서 최초 또는 최초로부터 몇 회의 CG에 의해서 발생하기 때문이다[4].

일반적으로 ALARM(자동낙뢰경보 및 리스크관리 시스템: automated lightning alert and risk management)은 LPS(피뢰시스템: lightning protection system)의 일환으로 공항, 광산, 군사시설, 우주선 발사대, 골프장, 레이더센터 및 방송 중계소 등에 설치된다. ALARM의 설치 및 운용 목적은 유효한 LT(선행 시간: lead time)을 갖는 사전경보의 촉발로 물리적 유형의 소손 보호를 비롯하여 전기·전자 시스템 및 인명을 보호하는 것이다.

본 논문에서는 CG 및 정전계 관측을 기반으로 하고 북반구 중위도에서 POL(낙뢰발생확률: probability of lightning)의 증대에 최적화된 ALARM을 시험운영하여 POL, POD(낙뢰탐지확률 또는 경보성공률: probability of detection), FAR(허위경보율: false alarm ratio) 및 FTW(경보실패율: failure-to-warn rate) 등 성능 파라미터의 통계적 분석에 대한 타당성을 검토하였다. 또한 분석과정을 기초로 하여 ALARM의 건전성을 평가하고 POD, POL의 향상, FAR과 FTW의 저감 및 유효 LT의 확보를 위한 방안 에 대하여 기술하였다.

## 2. 자동낙뢰경보 및 리스크관리시스템 (ALARM)

### 2.1 구성과 특징

ALARM은 TSS(뇌방전센서: thunderstorm sensor), EFM(정전계 측정기: electric field mill), 표출 및 경보 송출용 소프트웨어와 연동모듈로 구성되어 있으며, 이의 특징과 낙뢰표출방식을 각각 표 1과 그림 1에 나타내었다[5-7]. CG와 IC(운내방전: intracloud discharges)를 검출하는 TSS는 MDF(자계방향탐지: magnetic direction finding)방식이며, MDF와 TOA(도달시간: time of arrival)방식을 혼합한 미국의

NLDN(낙뢰관측네트워크: national lightning detection network)과 비교시험되었고 CG 탐지효율은 19km 이내에서 90% 이상이다[5].

표 1. ALARM의 구성과 특징  
Table 1. Construction and features of ALARM

구 성	특 징
TSS	- CG, IC 구별 관측 - 3단계(0-9, 9-19, 19-56km) CG관측, 8분할 방향 관측 - 무지향성 IC관측(0-56km) - 전·자계(2기)안테나, 광학센서 구성
EFM	- 설치위치의 뇌운발생과 소멸 탐지 - 탐지 범위 : 반경 20km - 정확도/측정범위 : ±10%/±10kV/m
소프트 웨어	- 실시간 뇌방전, 전계 강도 표출 - 자동 시청각 경보, 이메일 경보 전송 등
연동모듈	- 시청각 경보기, 발전기등과 연동



그림 1. ALARM의 표출영역  
Fig. 1. Indication domains of ALARM

전계의 세기 및 극성의 변화는 CG 사전 경보 및 FTW의 저감에 매우 유용한 정보이므로 대기 중의 정전계 관측에는 EFM을 적용하였다[6, 8-10].

TSS의 유효 탐지거리는 56km, EFM은 20km이므로 ALARM은 그림 1에 나타낸 바와 같이 PI(관심지

점: point of interest)를 중심으로 반경 56km내의 CG와 IC를 표출한다. PI는 ALARM의 설치장소, 즉 보호대상설비의 위치이며 AOC, WA(경보지역: warning area)과 WAA(주의지역: watch area)의 반경은 PI를 중심으로 각각 9km, 19km, 56km이다.

### 2.2 사전낙뢰경보의 촉발조건

북반구 중위도에서 POL의 증대에 최적화된 ALARM의 경보촉발조건은 표 2와 같다. 낙뢰경보촉발의 예로써 Warning Level은 WA의 구역에서 CG가 2분 동안 3회 이상 발생하고, EFM으로 검출된 전계의 세기가 설정 문턱값 이상일 때 발생한다. Watch Level 1, 2는 각각 WAA에 CG와 WA내 IC를 표출한다.

표 2. 낙뢰경보의 촉발조건  
Table 2. Giving conditions of lightning warning

Level	시간 간격 (min)	CG 횟수	EFM 문턱값 (kV/m)	뇌방전의 종류	해당 지역	논리 조합
Watch 1	1	1	+0.5, -2	CG	WAA	AND
Watch 2	1	1	+0.5, -2	CC(IC)	WA	AND
Warning	2	3	+1, -2.5	CG	WA	AND
High Alert 2	1	5	+1, -2.5	CG	WA	AND
High Alert 1	1	1	+1.5, -3	CG	AOC	OR

Watch Level 2가 WA에서 촉발되고 CG의 사전단계인 IC 경보 단계이므로 일부 경보시스템에서는 이를 사전 낙뢰경보단계로 간주한다[8]. 그러나 ALARM은 CG 관측기반의 낙뢰경보시스템이며, 90% 이상의 탐지효율은 CG로 제한되므로 본 논문에서는 Watch 2 Level을 사전 낙뢰경보단계로 간주하지 않는다. Warning, High Alert 2 그리고 High Alert 1(EFM)은 뇌운이 도착하기 전에 보호활동을 취하도록 설계되었고, High Alert 1(TSS)은 CG가 AOC내에 이미 존재함을 나타낸다. 그러므로 본 논문에서는

Warning, High Alert 2 및 High Alert 1(EFM)만을 사전 낙뢰경보단계로 간주한다. 낙뢰경보의 촉발을 위한 TSS-EFM간의 논리조합은 High Alert Level 1만이 'OR'이 적용되고 나머지 단계는 모두 'AND'를 적용하였다.

### 2.3 성능 분석파라미터

유효한 사전낙뢰경보는 다음 두 가지 조건에 모두 만족되어야 한다.

- (1) 사용자별 유효 LT의 확보
- (2) AOC내 최초 CG 발생 전 사전낙뢰경보단계의 촉발

LT는 사전낙뢰경보의 촉발과 AOC내 최초 CG 발생사이의 시간간격이며 뇌운의 이동속도, WA와 AOC의 넓이, 지형, 고도 그리고 낙뢰탐지율과 위치정확도 등에 의해 변동될 수 있다. LT는 낙뢰경보시스템의 사용자별로 요구시간이 다르며, 이는 최초 CG 전 인명의 대피, 전원차단 및 발전기의 연동 등과 같은 대처시간이 사용자별로 상이하기 때문이다. 그러므로 사전낙뢰경보시스템의 LT는 사용자별로 유효성 판단 기준을 달리해야 한다.

모든 CG에 대한 성공적인 사전낙뢰경보의 촉발은 가능하지 않으므로 낙뢰경보시스템 또는 알고리즘의 건전성은 통계적 확률로 분석되어야 한다. 그러므로 본 논문에서는 식 (1), (2), (3)을 ALARM의 건전성 판단기준으로 적용하였다[4, 6-8].

$$POD = \frac{SUC}{CGAOC} \tag{1}$$

$$FTW = 1 - POD \tag{2}$$

$$FAR = \frac{FA}{FA + SUC} \tag{3}$$

여기서 CGAOC : AOC 내에 최소한 하나 이상의 낙뢰가 발생하는 경보의 횟수  
SUC : 성공적인 사전경보의 횟수  
FA : 허위경보의 횟수

CGAOC의 경우 High Alert 1(TSS)만이 해당한다. POD는 경보성공확률이며, WA내의 낙뢰탐지율에 비례한다. AOC내 최초 CG발생 전 사전경보단계가 촉발되면 경보성공(SUC)이며, 사전낙뢰경보단계가 촉발되었으나 AOC내에 CG의 발생이 없다면 FA(허위경보율: false alarm)로 판정한다. 사전경보 없이 AOC내 최초 CG가 발생한다면 FTW이다[6, 8]. POL은 사전낙뢰경보의 촉발 후 AOC내에 실제로 낙뢰가 발생하는 확률이다. 이의 증대를 위해 FAR의 저감이 요구되며 본 논문에서는 식 (4)과 같이 POL을 산정하였다.

$$POL = 1 - FAR \quad (4)$$

POL과 POD는 상충관계(trade off relation)이므로 두 가지 확률을 동시에 증대시킬 수 없다. 즉 FAR과 FTW를 동시에 저감시킬 수 없다. 예를 들어 WA내 낙뢰경보의 촉발구역(sector)를 모두 선택하고 낙뢰경보의 촉발을 위한 이벤트수를 최소로 하면 FTW가 저감되어 POD가 증대될 것이나 필연적으로 FAR이 증대되어 POL 저감의 원인이 된다. 그러므로 사용자는 FTW 또는 FA로 인한 손실 등을 비교·평가하여 POD나 POL의 증대 중에서 어느 한 가지 목표만을 경보시스템에 적용할 수 있다. POD의 증대를 위한 알고리즘은 항상 인명 보호에 적용되며 통상 고가의 장비 보호에 적용된다. POL의 증대는 장비 보호조치에 비용과 시간이 많이 소비되는 경우에 적용된다[3]. 본 논문은 사전낙뢰경보가 촉발할 때 효율적인 발전기의 자동 운전 등을 위한 FAR의 저감, 즉 POL의 증대를 도모할 수 있는 경보알고리즘의 도출을 위해 ALARM을 시험적으로 운영하였다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 경보파라미터의 예시적 분석

##### 3.1.1 유효경보(SUC)

2013년 8월 29일 유효낙뢰경보에 대한 데이터의 예시적 해석을 표 3에 나타내었다. 11시 59분에 사전낙뢰경보 단계인 Warning Level(W)이 촉발되고 12시

10분에 AOC내 최초 CG가 발생하여 11분의 LT를 갖는 성공적인 사전낙뢰경보로 판정하였다.

표 3. 유효낙뢰경보의 예

Table 3. The example of successful lightning warning

표준 시간	촉발 Level	검출 센서	CG 횟수	EFM (kV/m)	
				Min.	Max.
11:29	WL1	EFM, TSS	1	-10.2	3.64
11:59	W	EFM, TSS	3	-5.14	10.2
12:10	HA1	TSS	1		
16:00	W	Clear			
16:04	HA1	Clear			
06:00	WL1	Clear			

##### 3.1.2 허위경보(FA)

2013년 4월 29일에 관측된 FA의 예시적인 데이터를 표 4에 나타내었다. 6시 3분, 8시 26분에 High Alert 1(EFM)이 사전낙뢰경보로서 촉발되었으나 AOC내 CG 발생이 없으므로 즉 High Alert 1(TSS)의 촉발이 없으므로 FA로 판정하였다.

표 4. 허위경보의 예

Table 4. The example of false alarm

표준 시간	촉발 Level	검출 센서	CG 횟수	EFM(kV/m)	
				Min.	Max.
06:03	HA1	EFM		0.96	1.52
06:11	WL2	EFM, TSS	1	-10.2	-8.66
06:18	WL1	EFM, TSS	1	5.5	10.2
08:26	HA1	Clear			
08:26	HA1	EFM		-3.02	0.88
08:33	HA1	Clear			
08:42	WL1	Clear			
08:42	WL2	Clear			

##### 3.1.3 경보실패(FTW)

2013년 4월 14일 검출된 경보실패에 대한 예시적 데이터를 표 5에 나타내었다. 0시 11분, EFM으로 검출된 전계문턱값의 초과로 High Alert 1(EFM)이 촉발

되었으나 2시 7분 경보 해제 후 High Alert 1(TSS)이 촉발되었으므로 경보실패로 판정하였다.

표 5. 경보실패의 예  
Table 5. The example of false-to-warn

표준 시각	촉발 Level	검출 센서	CG 횟수	EFM (kV/m)	
				Min.	Max.
0:11	HA1	EFM		0.48	4.5
0:53	WL1	EFM, TSS	1	0.8	6.12
0:55	WL2	EFM, TSS	1	4.12	5.62
2:07	HA1	Clear			
2:11	HA1	TSS	1		
2:28	HA1	Clear			

경보실패에 대한 주요 원인은 사전경보촉발을 위한 CG 발생수에 대한 과대한 문턱값의 설정이다. 사전낙뢰경보 단계인 Warning과 High Alert Level 2의 경보 촉발 조건은 WA내 선택된 구역에서 각 2분 이내 3회의 CG, 1분 이내 5회의 CG이다. 뇌운이 반경 10km의 WA를 경유 시 문턱값 이하의 CG횟수가 경보실패의 주요 원인이 된다. 그러므로 장기운영결과에 기초하여 경보촉발을 위한 CG 발생 문턱값의 수정과 경보해제 문턱값의 설정에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 또한 스페인에서 시험 운영된 낙뢰경보시스템의 경우 유효한 경보(POD 또는 유효경보)를 촉발하기 위한 AOC와 WA의 최적 비율을 0.25로 제안한다[7]. ALARM은 AOC와 WA의 비율이 약 0.47이므로 AOC에 비하면 WA의 반경이 상대적으로 작아서 FTW 증대의 원인이 된 것을 알 수 있다. 국내 최적 비율 연구를 위해서는 탐지거리에 제한이 없는 관측시스템 기반의 경보시스템 운영 등 다각적인 운전조건에 대한 결과의 분석과 검토에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 그것으로 실험적 연구와 최적 비율의 산정이 가능할 것이다.

높은 POD 또는 경보 성공률의 향상을 위해서 WA의 모든 섹터 선택과 경보촉발을 위한 이벤트 수의 최소화가 요구된다[6]. 그러나 이것은 FAR 증대로 인한 POL 저감의 원인이 되므로 향후 뇌운의 이동속도, 유

입방향 CG 발생 수 등에 대한 통계적 분석으로 WA의 구역 선택과 경보촉발 이벤트수의 최적화에 대한 검토가 요구된다.

### 3.1.4 무효 선행시간(LT)

2013년 8월 6일 무효 LT에 대한 데이터의 예시적 해석을 표 6에 나타내었다. 13시 37분에 사전낙뢰경보 단계인 High Alert 1(EFM)이 촉발되고 17시 1분에 High Alert 1(TSS)이 촉발되어 사전경보는 성공적이거나 LT가 2시간 59분이므로 이를 무효 LT로 판정하였다. 즉 유효한 사전경보로 판정하지 않았다. 유효한 LT는 사용자별로 요구되는 LT를 확보해야하므로 본 논문에서는 30분이상의 LT는 무효로 판정하였다.

표 6. 무효 선행시간의 예  
Table 6. The example of ineffective lead time

표준 시각	촉발 Level	검출 센서	CG 횟수	EFM (kV/m)	
				Min.	Max.
12:21	WL1	TSS/EFM	1	-2.5	-2.32
13:37	HA1	EFM		-2.48	2.46
14:45	WL2	TSS/EFM	9	-2.34	2.48
15:01	W	TSS/EFM	3	-5.08	1.34
15:16	HA2	TSS/EFM	5	-4.82	2.94
16:36	HA1	Clear			
17:01	HA1	TSS	1		
17:37	HA1	Clear			
17:38	W	Clear			
17:38	HA2	Clear			
17:48	WL1	Clear			
17:48	WL2	Clear			

유효한 사전낙뢰경보는 사용자별로 요구되는 LT를 확보해야 한다. ALARM의 경우 TSS의 유효탐지거리와 위치정확도가 제한되어 WA의 반경이 고정되어 있으므로 뇌운의 유입속도에 비례한 LT만을 제공할 수 있다. 즉 사용자별로 요구되는 LT의 제공이 곤란하다. 예로써 뇌운의 이동속도를 40km/h로 가정하면 WA의 반경이 10km로 고정됨으로 제공할 수 있는 최대 LT는

15분이다. 15분의 LT는 15분 동안 인명의 대피, 설비나 기기 보호를 위한 사전준비시간의 최대값이므로 15분의 LT는 사용자별로 유효성이 상이하다. 그러므로 사용자별 유효 LT의 확보를 위해서는 뇌운의 이동 속도 등에 따라 WA, AOC의 반경 변경이 가능해야만 하며 이를 위해서는 유효탐지거리가 전국을 포함하는 관측시스템을 기반으로 하는 새로운 낙뢰경보시스템의 개발이 필수적으로 요구됨을 알 수 있다.

### 3.2 시험운영결과

2013년 4월부터 8월까지 5개월 동안 POL의 증대에 최적화된 ALARM의 운영결과를 통계적으로 분석한 결과를 표 7에 나타내었다. 비록 ALARM시스템으로 얻어진 데이터의 수는 적었으나 정상적인 낙뢰경보에 대한 성능 파라미터를 분석할 수 있음을 알았다.

표 7. 시험적 운영 결과  
Table 7. Trial test results

월	횟수					확률[%]			
	사전 경보	CGAOC	SUC	FA	FTW	POD	POL	FAR	FTW
4	25	2	0	23	2	0	0	100	100
5	5	1	0	4	1	0	0	100	100
6	6	1	0	5	1	0	0	100	100
7	46	5	1	41	4	20	2.4	97.6	80
8	42	10	3	32	7	30	8.6	91.4	70
종합	124	19	4	105	15	21.1	3.7	96.3	78.9

ALARM의 건전성 판단을 위해 선행된 국외 자동낙뢰경보시스템과의 성능비교를 표 8에 나타내었다[9-12]. 국외 자동낙뢰경보시스템의 경우도 낙뢰경보성공률의 편차가 크며, 이는 관측시스템과 설치지점의 지형적 특성 등에 관련이 있는 것으로 판단된다. 표 8에 나타난 바와 같이 ALARM의 POD와 POL가 국외의 유사 시스템에 비하여 낮은 것으로 나타났고 이는 낙뢰경보의 촉발 및 해제 조건 등을 최적으로 설정하지 못하여 기인된 것으로 사료되며, 향후 ALARM의 운영결과를 바탕으로 지속적인 개선이 필요함을 알 수 있다.

표 8. 외국 자동낙뢰경보시스템 운영결과와의 비교  
Table 8. Comparison among the test results of automated lightning warning systems operated in foreign countries

설치	연도	POD	POL	시스템 구성
미국	2008	66.7%	31.6%	CG 관측 단독
미국	2008	34.4%	25.9%	CG관측-EFM 조합
콜롬비아	2009	70%	40%	CG 관측 단독
브라질	2011	58%	59%	EFM 단독
한국	2013	21.1%	3.7%	CG관측-EFM 조합

뇌운의 근접과 소멸에 따른 전계의 극성과 크기의 변화는 사전낙뢰경보의 촉발에 유용하며 특히 주상(over head)의 뇌운발생탐지는 AOC내 최초 CG에 대한 사전낙뢰경보를 가능하게 한다[8-11]. 그러나 FA의 주요 원인, 즉 POL 저감의 주요원인은 EFM으로 관측한 전계의 세기에 의해 기인될 가능성이 높은 것으로 추정된다. 따라서 EFM의 적용 여부와 경보과라미터의 추이를 조사하였으며, 이의 통계적 변동특성을 표 9에 나타내었다.

표 9. EFM의 적용에 따른 성능 파라미터의 변동추이  
Table 9. Changing trend of the performance parameters by applying EFM

EFM	횟수				확률[%]			
	CGAOC	SUC	FA	FTW	POD	POL	FAR	FTW
적용	15	4	73	11	26.7	5.2	94.8	73.3
미적용	15	4	8	11	26.7	33.3	66.7	73.3

2013년 7월과 8월의 운영결과에서 EFM으로 인한 사전경보를 제외한 경우 POL이 5%에서 33%로 증대되어 EFM이 명백히 FAR의 증대에 대한 원인임을 알 수 있다. 그러므로 EFM을 경보시스템에서 제거하거나 장기관측 결과에 준한 경보촉발과 해제 문턱값의 조정 및 TSS-EFM간 논리조합의 수정이 필요함을 알 수 있다. 또한 EFM의 최대와 최적 탐지거리가 각각 20km, 10km로 제한됨에도 Watch Level 1, Watch Level 2, Warning 및 High Alert Level 2의 촉발조건으로 TSS-EFM간의 논리조합을 'AND'로 적용하는

것 역시 FAR 증대의 원인이 된다[5, 12]. 뇌운이 AOC를 경유하지 않고 우회하는 FA의 불가항력적인 경우는 총 105회의 FA 촉발 중 5회(약 4.8%)에 불과하여 경미한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

AOC내 최초 CG 전 사전경보를 촉발할 수 있는 자동낙뢰경보시스템의 구축과 촉발된 경보의 건전성을 판단할 수 있는 성능 파라미터의 분석에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. CG·대기전계 관측을 기반으로 POL의 증대에 최적화된 ALARM을 시험운영하여 촉발된 사전낙뢰경보를 통계적으로 분석하고 건전성을 판단하는 기법과 성능 파라미터의 분석결과에 준한 사전낙뢰경보의 건전성을 향상시킬 수 있는 방안을 제안하였다. 시험운영결과 POL과 POD는 각각 약 3.7%, 21.1%로 분석되었으나 이는 사전경보촉발 및 해제 문턱값의 조정, TSS-EFM간의 논리조합 수정, POD 최적화 알고리즘의 적용 등으로 개선될 것이며, 무엇보다 유효 LT확보를 위한 전국규모의 낙뢰관측시스템을 기반으로 하는 새로운 경보시스템의 개발이 필요한 것으로 밝혀졌다.

향후 유효사전낙뢰경보의 촉발과 POD의 증대를 위하여 레이더, 위성 데이터를 융합한 자동낙뢰경보알고리즘의 개발을 위한 기초연구가 요구된다.

#### References

[1] M. A. Uman., The Art and Science of Lightning protection. Cambridge University Press, New York, pp. 134-138. 2008.  
 [2] R. A. Rakov and M. A. Uman., Lightning-Physics and Effects, Cambridge University Press, New York, pp. 588-654. 2003.  
 [3] J. S. Jensenius and D. B. Franklin, "Lightning Kills - Play it safe - NOAA's Effects to educate the public on the dangers of lightning", 19th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, CD-ROM, 2006.  
 [4] M. M. Lengyel, "Lightning casualties and their proximity to surrounding cloud-to-ground lightning". M.S. Thesis. University of Oklahoma, 2004.  
 [5] User's Guide, "Thunderstorm Sensor Model 928". VAISALA, 2003.  
 [6] User's Guide, "ALARM v1.1". VAISALA, 2003.

[7] User's Guide, "EFM550". VAISALA, 2003.  
 [8] M. J. Murphy and R. L. Holle, N. W. S. Demetriades, "Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations". 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, 2008.  
 [9] J. Montanya, D. Aranguren, N. Pineda, G. Sola, D. Romero, V. March, "Total lightning, electrostatic field and meteorological radar applied to lightning hazard warning". 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, CD-ROM, 2008.  
 [10] M. J. Murphy and R. L. Holle, "Warnings of cloud-to-ground lightning hazard based on combinations of lightning detection and radar information". 19th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, CD-ROM, 2006.  
 [11] M. A. S. Ferro, J. Yamasaki, D. R. M. Pimentel, K. P. Naccarato, M. M. F. Saba., "Lightning risk warnings based on atmospheric electric field measurements in Brazil", J. Aerosp.Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.3, No.3, pp. 301-310, Sep. - Dec., 2011.  
 [12] J. Inampué, D. Aranguren, H.Torres, J. Montanya, I. Santoyo, E. Olarte, C. Younes., "Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data". 10th International Symposium on Lightning Protection. Curitiba, Brazil, 2009.

#### ◆ 저자소개 ◆



**심해섭**(沈海燮)  
 1974년 1월 7일생. 2009년 서울산업대학교 대학원 졸업(석사). 2004~2006년 극지연구소 남극세종과학기지 18차 월동연구대. 2007년~현재 기상청 국가기상위성센터 주무관.



**이복희**(李福熙)  
 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~2011년 본 학회 회장, 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 명예회장.