

## 농업서리 자동관측 시스템(AAFOS)의 구현

김규령\*, 조은수, 고명수, 강정혁, 황윤재, 이용희

국립기상과학원 기상응용연구부

(2023년 09월 11일 접수; 2023년 10월 25일 수정; 2023년 12월 07일 수락)

## Implementation of an Automated Agricultural Frost Observation System (AAFOS)

Kyu Rang Kim\*, Eunsu Jo, Myeong Su Ko, Jung Hyuk Kang, Yunjae Hwang, Yong Hee Lee

*Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences*

(Received September 11, 2023; Revised October 25, 2023; Accepted December 07, 2023)

### ABSTRACT

In agriculture, frost can be devastating, which is why observation and forecasting are so important. According to a recent report analyzing frost observation data from the Korea Meteorological Administration, despite global warming due to climate change, the late frost date in spring has not been accelerated, and the frequency of frost has not decreased. Therefore, it is important to automate and continuously operate frost observation in risk areas to prevent agricultural frost damage. In the existing frost observation using leaf wetness sensors, there is a problem that the reference voltage value fluctuates over a long period of time due to contamination of the observation sensor or changes in the humidity of the surrounding environment. In this study, a datalogger program was implemented to automatically solve these problems. The established frost observation system can stably and automatically accumulate time-resolved observation data over a long period of time. This data can be utilized in the future for the development of frost diagnosis models using machine learning methods and the production of frost occurrence prediction information for surrounding areas.

**Key words:** Frost, Observation, Leaf, Wetness



\* Corresponding Author : Kyu Rang Kim  
(krk9@kma.go.kr)

## I. 서 론

농업에서 서리는 주로 봄철과 가을철에 새싹과 수확물에 큰 피해를 줄 수 있다. 서리에 의한 피해는 국지적이며 간헐적으로 나타나지만 그 영향은 치명적이기 때문에 작물생산의 주된 제한요소이다(Maracchi *et al.*, 2005). 특히 지구온난화로 인해 재배기간이 길어지고 있음에도 불구하고, 한국에서 최근 21년간 관측된 서리를 분석해 보면 서리일수가 줄어들거나 겨울 첫서리일이 늦춰지는 경향은 나타나지 않았으며, 봄철 늦서리일은 1년에 0.5일씩 늦춰지는 것으로 나타났다(Jo *et al.*, 2022). 이런 경향이 지속된다면 앞으로 농업 피해의 증가가 예상된다.

기상청은 지상기상관측지침(KMA, 2022)에 의거하여 2021년 기준 전국 23개 유인관측소에서 서리를 관측하고 있다. WMO의 분류 기준을 참고하여 작성된 이 지침에 따르면 관측장소 또는 관측지점에서 목적으로 식별할 수 있는 범위 내에 존재하는 서리를 하루 중 오전과 오후로 나누어 발생유무를 기록한다. 이렇게 관측된 서리 자료는 기계학습을 통해 내일, 모레, 글피의 서리에측정보로 제공되고 있다(<https://bd.kma.go.kr/kma2020/fs/frostSelect3.do>).

기존의 기상청 서리관측 자료는 농업지역에서 거리가 떨어져 있으며 사람(관측자)이 직접 눈으로 관찰하고 판단하여 오전과 오후에 한 번씩 기록하는 방식으로 진행되고, 관측 주체가 정해져 있지 않기 때문에 대표성과 시간 해상도에 있어 제약이 있었다. 농업지역의 서리관측을 자동화함으로써 시-공간적 상세한 관측자료를 확보하고 이를 이용하여 진단모델 개발과 예측 정보를 생산할 필요가 있다.

자동화된 서리관측 시스템의 한 예로 Savage (2012)의 열적외선 지표온도센서, 접촉식 초상온도센서 및 엽면습윤센서 기반 시스템을 들 수 있다. 이 시스템에서는 지표온도 또는 초상온도가 영하로 내려가거나 엽면습윤센서 전압이 제조사가 제시한 건조 판단 전압과 습윤 판단 전압 사이에 포함될 경우 서리가 내리는 것으로 판단하였다. 각 방법별로 서리 지속시간에 차이가 있었는데, 지표온도센서 > 초상온도센서 > 엽면습윤센서의 순으로 짧아졌다. 지표면온도가 영하일 때 무조건 서리가 생기는 것은 아니기 때문에 엽면습윤센서를 이용하여 센서 위의 수분 유무를 관측한 방법의 타당성이 가장 높아 보인다. 하지만 센서 전압이 건조와 습윤 사이 구간을 오르내릴 때 서리로 오 분류되는

것을 방지하기 위하여 추가한 전압변동 속도는 주변의 습도에 따라 영향 받을 수 있으며, 습윤 상태 판단의 기준이 되는 건조상태일 때의 전압이 개별 센서에 따라 동일하지 않은 문제가 관찰되었다(Savage, 2012).

국내 농경지에서의 서리 자동관측 연구는 Noh *et al.* (2021)의 RGB 카메라를 이용한 방법, Kim *et al.* (2022)의 RGB 및 열적외선 카메라와 엽면습윤센서를 이용한 방법 등이 보고된 바 있다. 하지만 RGB 카메라를 이용한 방법은 표면의 색상이 밝거나 야간인 경우 서리 발생을 탐지하지 못하였고, 엽면습윤센서는 표면의 수분 존재에 민감하게 반응을 하였으나 제조사에서 제시한 서리판정을 위한 전압 범위 밖에서 서리가 관측되는 사례가 다수 발생하였다. 이는 높은 습도의 영향으로 센서에 부착된 서리의 양이 많아졌기 때문인 것으로 판단되었다(Kim *et al.*, 2022). 최근, Kim *et al.* (2023)은 RGB 카메라의 야간 촬영이 불가능한 문제를 삼중 유리판, 엽면습윤센서 표면 검정색 도색 및 야간 LED 조명 설치로 해결하고, 열적외선 카메라가 실제 온도를 관측하지 못하는 문제는 영상자료에서 표면 온도값을 추출하는 방법으로 보완한 MFOS v2를 소개하였다.

상기 국내의 연구에서 사용한 엽면습윤센서는 위쪽 표면 약 1cm 공간의 유전 상수(dielectric constant)를 감지하여 전압으로 출력하는 센서로 물(80)과 얼음(5)의 유전 상수가 공기(1)보다 월등히 큰 원리를 이용한 것으로 센서에 쌓인 물 또는 얼음의 양에 비례하여 출력 전압이 높아진다. 단점으로는 센서의 오염도에 따라서 전압이 증가하는 현상이 발생하는데, 제조사도 이에 대비하여 습윤을 판단하는 기준 전압을 두 개로 설정한 데이터로거 프로그램을 예시하고 있다(Decagon Devices, 2016).

본 연구에서는 엽면습윤센서의 전압과 표면온도를 관측하여 센서 표면에 존재하는 고체상 수분(얼음 또는 서리)의 존재 유무를 자동 판단하되 센서의 오염 등에 의한 영향을 최소화할 수 있는 관측기기 및 데이터로거 구동 프로그램을 제시함으로써 농업지역 서리 관측 자동화에 기여하고자 한다.

## II. 데이터로거 및 센서 구성

본 연구에서 사용한 데이터로거 및 센서는 Table 1과 같다. 제조회사 및 모델명은 구체적 예시를 위한 것으로 농업서리 자동관측 시스템은 이와 유사한 기능

**Table 1.** Hardware setup for the Automated Agricultural Frost Observation System (AAFOS): datalogger and meteorological sensors

Company	Model	Description
Campbell Scientific Inc.	CR800	Datalogger
Campbell Scientific Inc. / Decagon Devices Inc.	LWS-D	Dielectric Artificial Leaf Wetness Sensor
Apogee	SI-431	Infrared Radiometer Sensor

을 갖는 다양한 회사의 제품을 사용하여 구현할 수 있을 것이다. 엽면습윤센서(LWS-D)는 가로, 세로, 두께가 각각 60, 70, 0.65 mm의 흰색 타원판 형태이며 비열, 밀도, 두께, 열용량, 복사 균형, 소수성 등이 실제 잎과 유사한 특성을 가지고 있다. 출력되는 전압은 입력 전압의 10 - 50%로 3000 mV 입력시 출력 범위는 320 - 1000 mV이며, 건조시 기준 전압은 326 mV로 공장 교정되어 있다(Decagon Devices, 2016). 적외선 복사센서(SI-431)는 시야각(field of view)의 반각이 14°로 LWS-D의 약 7 cm 위에 약 30° 만큼 어긋나게 설치함으로써 약 11 cm<sup>2</sup>의 시야각 면적으로 LWS-D의

중양 부위 표면온도를 측정한다(Apogee Instruments, 2020).

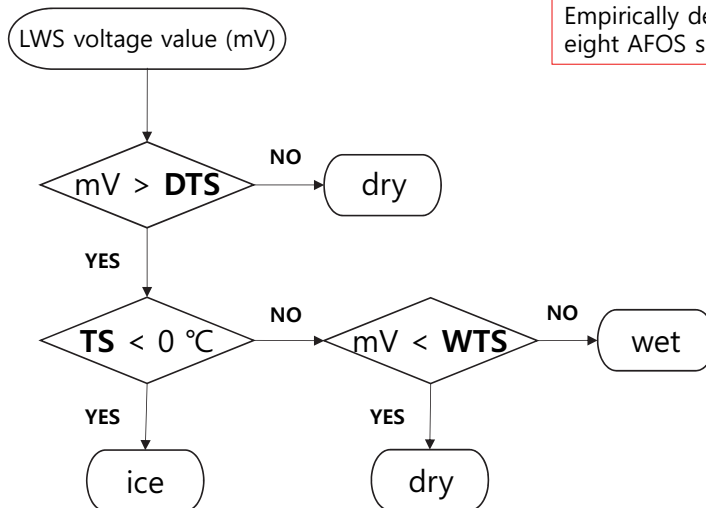
### III. 데이터로거 구동 프로그램 예시 및 설명

CR800 데이터로거는 CRBasic 언어와 Campbell Scientific 사의 CRBasic Editor을 이용하여 프로그래밍하였다(<https://help.campbellsci.com/crbasic/cr6>).

데이터로거 구동 프로그램은 출원된 한국특허(10-2023-0064612)의 논리구조를 따르지만(Fig. 1),

$$\begin{aligned}
 \text{TS (Surface temp)} &= \text{Surface temp of LWS (}^\circ\text{C)} \\
 \text{DTS (Dry threshold, empirical value)} &= \text{LDI}^* + 7 \text{ mV} \\
 \text{WTS (Wet threshold, empirical value)} &= \text{DTS} + 10 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

Empirically derived from case analysis of eight AFOS sites from Nov. '21 to May '22

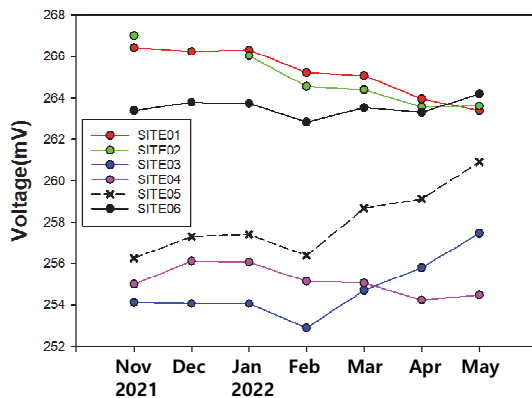


\*LDI (LWS Dry Index) = The mV of moving minimum (MM3) for the past 3 days based on the current time in minutes, or the average of the MM3 for the past 3 days (AMM3) if no dry values were observed in the past 3 days.

**Fig. 1.** Logical flowchart of the Korean patent-pending frost determination algorithm (Application number 10-2023-0064612).

데이터로거의 연산 속도와 메모리 사용 효율 등을 고려하여 3일 이동 최소값을 분단위로 산출하지 않고 일단위로 산출하도록 수정되었다(Appendix). 전반적인 엽면습윤 센서의 전압 및 열적외선 표면온도는 10 초 간격으로 측정한다. 엽면습윤센서의 전압은 센서 표면에 물 또는 얼음이 존재할 때 높아지는데, 관측된 전압이 건조임계값(DTS) 이상이면서 표면이 영하인 경우 서리가 발생하였다고 판단한다. 전압이 습윤임계값(WTS) 이상이면서 표면이 영상인 경우 이슬이 발생하였다고 판단하며 이외의 경우는 건조한 것으로 판단한다. 경험적으로 DTS는 건조기준값(LDI) + 7 mV로, WTS는 DTS + 10 mV로 설정한다. 여기서 LDI는 과거 3일간 DTS 이하의 전압이 관측되었을 경우에는 그 기간 ‘일 최소 전압값(MM1)’ 중 최소 전압값(MM3)으로, 그 외에는 ‘3일 이동 최소 전압값(MM3)’의 과거 3일간 평균(AMM3)으로 설정한다(Fig. 1). 단, 프로그램 구동후 최초 3일간은 제조사에서 제시한 DTS값인 274 mV 기준을 사용한다.

서리가 발생하기 시작할 때의 전압(건조임계값, DTS)은 센서가 건조했을 때 기본적으로 출력되는 전압인 건조기준값(LDI)과 큰 차이가 나지 않기 때문에 (Savage (2012)의 Fig. 1) 서리 발생을 민감하게 관측하기 위해서는 센서의 LDI 값을 정확하게 알고 있어야 한다. 강원도내 6개 지점에서 ‘21년 11월에서 ‘22년 5월 동안 관측된 LDI 값은 크게 증가(Fig. 2의 SITE03, 05)하거나 약간 감소(Fig. 2의 SITE01, 02)하거나 유지(Fig. 2의 SITE04, 06)되었는데, 관측된 7개



**Fig. 2.** Long-term changes in monthly mean of daily minimum voltages from the dielectric leaf wetness sensors installed at each Agricultural Frost Observation site.

월간 변동 범위는 최대 약 4.76 mV이다(Fig. 2의 SITE05). 이와 같이 LDI는 엽면습윤센서의 오염 등에 따라 변하는데, 제조사에서는 이 문제를 해결하기 위하여 두 개의 기준 전압(3000 mV 입력전압 기준으로 기본 330 mV 또는 오염시 337 mV)을 이용하여 이슬 유무를 판정하도록 하는 데이터로거 프로그램을 제시하였다(Decagon Devices, 2016). 하지만 유전 상수가 물의 1/16인 서리를 감지하기 위해서는 엽면습윤센서가 건조할 때의 기준 전압인 LDI의 변화를 잘 추적하는 것이 중요하다. 수분이 충분히 건조된 오염물질만으로 일어난 LDI 값의 변화를 추적하기 위해 국내 기후조건을 고려하여 3일간의 최소 전압값으로 사용하였다. 단, 기상현상(눈, 비 등)으로 인해 3일간 엽면습윤센서 표면에 건조사례가 한 번도 발생하지 않은 경우, 최소 전압값들의 과거 3일간의 평균으로 보완하였다.

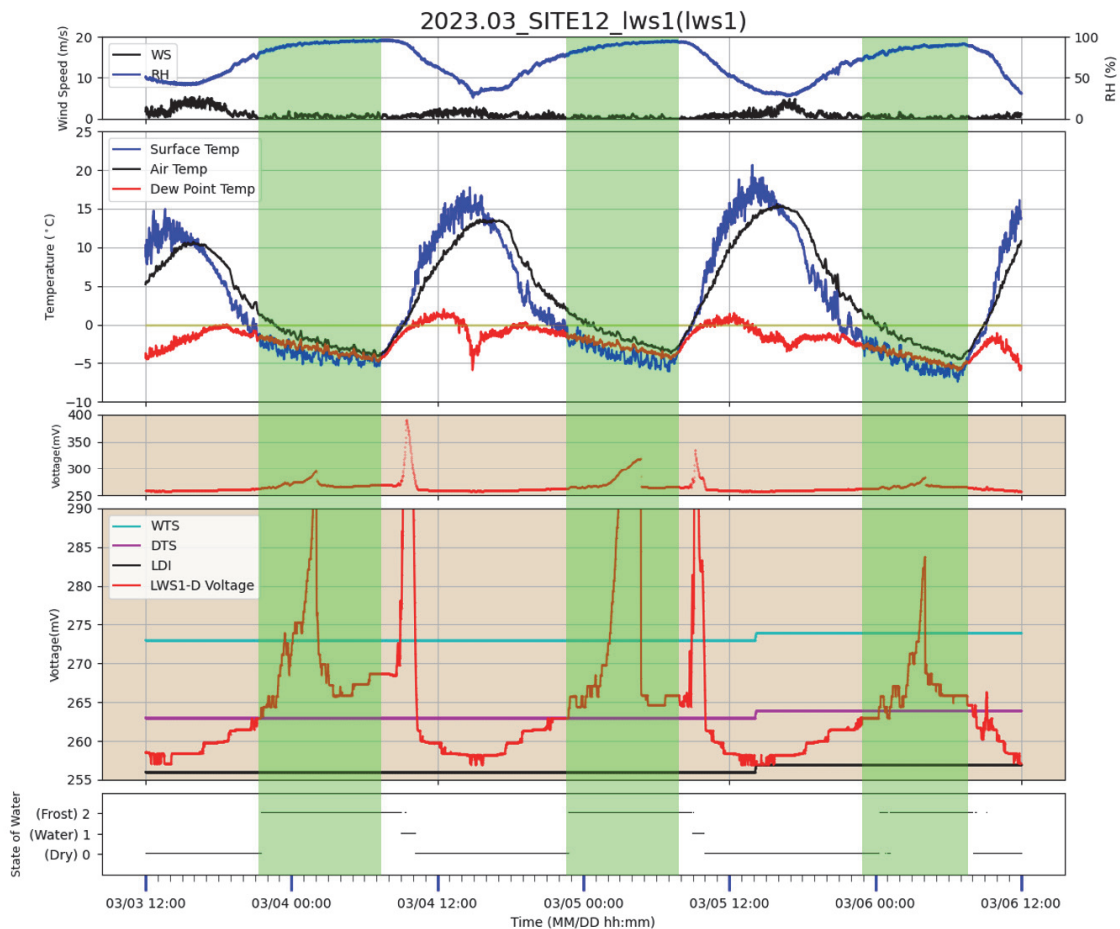
LDI에서 서리 판단에 필요한 추가 전압(alpha)은 센서 제조사의 제시 프로그램(Decagon Devices, 2016), 데이터로거 제조사의 센서 매뉴얼(Campbell Scientific, 2018), Savage (2012)와 Kim 등(2022)의 관측자료 및 ‘21년 11월에서 ‘22년 5월까지의 관측 결과를 종합적으로 고려하여 결정하였다. 센서 제조사 프로그램의 건조임계값은 3000 mV 입력전압일 때 기본 330 mV 또는 오염시 337 mV로 공장 교정된 건조시 기준전압인 326 mV에 비해 4 - 11 mV 높다. 데이터로거 제조사는 센서 입력전압으로 2500 mV, 건조임계값으로 274 mV를 사용하였는데, LDI 전압이 명시되지는 않았으나 센서 작동 예시 그림에서는 LDI 전압과 건조임계값이 5 mV 정도 차이가 있었다. Savage (2012)의 Fig. 2에서 확인된 건조시 최저 전압은 262 - 264 mV 수준이고, 서리 발생시작시 전압은 274 mV 정도로 전압 차이는 10 - 12 mV였다. Kim 등(2022)의 관측자료에서는 건조시 최저 262 mV, 서리발생 시작 전압과의 전압 차이는 약 8 - 15 mV였다. 강원도내 6개 지점에서 ‘21년 11월에서 ‘22년 5월 동안 관측된 LDI는 지점별로 253 - 267 mV 수준이었고, LDI와 서리발생 시작 전압과의 차이는 5 - 10 mV 수준이었다. 서리 판단을 위한 추가 전압(alpha)이 작을수록 감지 민감도는 향상되지만 판단 오류는 증가하기 때문에 alpha를 7 mV로 설정하였다. 이렇게 함으로써 강원도내 6개 지점의 서리 판단을 위한 건조임계값은 지점 및 시간에 따라 260 - 274 mV로 결정되었다. 이에 따라 274 mV라는 고정값을 사용하는 데이터로거 제조사 방법에 비하여 실제 농업환경에서 발생하

서리의 많은 부분을 놓치지 않을 수 있었고, 센서 표면의 오염도 증가에 따른 서리 관측 오류도 방지할 수 있었다. 건조임계값(DTS)과 습윤임계값(WTS)과의 차이(beta)는 데이터로거 제조사가 제시한 예시 프로그램과 동일하게 10 mV로 설정하였다.

예시된 프로그램은 1분, 10분 및 1시간 간격으로 LWS-D의 평균 전압, 표면 물상태별(건조-습윤-얼음) 시간(분), 평균 표면온도를 저장한다. 1일 간격으로는 LWS-D의 평균 전압, 표면 물상태별(건조-습윤-얼음) 시간(분), 평균, 최저, 최고 표면온도 및 일 최소 MMI, 일 최종 MM3, DTS, WTS, 배터리전압, 패널온도를 저장한다.

## IV. 결 과

본 연구에서 개발된 서리 자동관측 시스템의 구동 결과 사례는 Fig. 3 및 Table 2, 3와 같다. Fig. 3 관측 사례일인 2023년 3월 3일부터 6일의 날씨는 대체로 맑음이었으며 4일과 5일에는 박무와 연무가 관측되었다. 그림에서 음영으로 표시한 구간은 표면온도(SI-431)가 영하이면서 이슬점온도(DPT) 보다 낮아진 구간으로 이론적인 서리 발생 구간이다. 이 때, 이슬점 온도를 추정하기 위한 기온과 습도의 관측 높이가 LWS-D 관측 높이와 동일하여야 하고, 표면에 실제로 고체상태의 수분이 존재하는지는 LWS-D로만 관측할 수 있다는 점을 고려하여야 한다. 비교 결과 이론적인 서리 발생 구간은 LWS-D 센서의 전압값과 SI-431의 표면온도를 이용하여 판단한 서리구간(물상태=2)과



**Fig. 3.** Sample output of the Automated Agricultural Frost Observation System (AAFOS).

**Table 2.** Sample outputs by the AAFOS: 1-minute interval output

TIMESTAMP	RECORD	LWmV_Avg	LWMDry_Tot	LWMWet_Tot	LWMFrost_Tot	LWS_TC_Avg
TS (LST)	RN	mV Avg	Minutes Tot	Minutes Tot	Minutes Tot	Deg C Avg
2023-10-23 14:40	9391	273.3	1	0	0	12.59
2023-10-23 14:41	9392	274.6	0.667	0.333	0	11.11
2023-10-23 14:42	9393	276.1	0	1	0	8.71
2023-10-23 14:43	9394	278	0	1	0	7.08
2023-10-23 14:44	9395	280.1	0	1	0	4.81
2023-10-23 14:45	9396	282.7	0	1	0	2.97
2023-10-23 14:46	9397	286.2	0	1	0	1.32
2023-10-23 14:47	9398	289.9	0	0.167	0.833	-0.58
2023-10-23 14:48	9399	294.2	0	0	1	-1.26
2023-10-23 14:49	9400	299.2	0	0	1	-1.39
2023-10-23 14:50	9401	306.4	0	0	1	-1.63
2023-10-23 14:51	9402	313.7	0	0	1	-1.49
2023-10-23 14:52	9403	322.4	0	0	1	-1.82
2023-10-23 14:53	9404	328.7	0	0	1	-2.22
2023-10-23 14:54	9405	333.2	0	0	1	-3.09
2023-10-23 14:55	9406	337.5	0	0	1	-4.41
2023-10-23 14:56	9407	342.9	0	0	1	-5.72
2023-10-23 14:57	9408	349.8	0	0	1	-6.57
2023-10-23 14:58	9409	358.3	0	0	1	-7.17
2023-10-23 14:59	9410	367.9	0	0	1	-7.62

**Table 3.** Sample outputs by the AAFOS: daily output

TIMES	RECO	LWmV	LWM	LWM	LWMF	LWS_	LWS_	LWS_	MM1_	MM3	DTS	WTS	BattV_	PTemp
TAMP	RD	_Avg	Dry	Wet	rost	TC	TC	TC	Min				Min	_C
TS (LST)	RN	mV Avg	Minutes Tot	Minutes Tot	Minutes Tot	Deg C Avg	Deg C Min	Deg C Max	Min	Smp	Smp	Smp	Volts Min	Deg C Avg
2023-10-17 0:00	0	261.3	451.5	0	0	13.99	10.44	27.94	257.3	262.4	274.0	284.0	12.26	17.42
2023-10-18 0:00	1	261.2	1440	0	0	16.42	8.94	28.66	256.7	257.3	274.0	284.0	11.85	18.08
2023-10-19 0:00	2	263.3	1440	0	0	17.62	11.06	30.37	257.3	256.7	274.0	284.0	11.20	19.06
2023-10-20 0:00	3	260.4	366	0	0	28.09	27.66	29.50	260.1	256.7	263.7	273.7	11.65	28.61
2023-10-21 0:00	4	259.4	1440	0	0	27.16	21.19	28.07	258.7	257.3	263.7	273.7	12.45	27.71
2023-10-22 0:00	5	258.4	1440	0	0	27.43	26.31	29.65	258.0	258.7	264.3	274.3	12.94	27.37
2023-10-23 0:00	6	258.6	1440	0	0	27.60	26.53	29.92	258.0	258.0	265.0	275.0	12.95	27.45
2023-10-24 0:00	7	265.8	1332	48.17	59.83	18.98	-19.62	28.14	258.0	258.0	265.0	275.0	12.04	20.26

유사하였다. 다만 일출시간대에 이론적 서리생성시간에 비해 LWD-D 센서에서 더 오랫동안 서리가 관측되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 표면온도가 DPT보다 높아진다고 바로 서리가 사라지는 것이 아니고, 서서히 승화되며 사라지기 때문이다. 그리고 서서히 승화되어 소멸하던 서리는 표면온도가 영상으로 올라가면서 잔여 서리가 이슬(물상태=1)로 짧게 상변화가 일어나고, 이후 증발하여 다시 건조구간(물상태=0)으로 되돌아가는 등 관측 결과가 이론에 부합하는 것을 확인하였다.

알고리즘을 통해 산출된 물상태(건조, 이슬, 서리)의 정확성 검증은 위하여 센서 주변 농업지역 내에서 획득한 영상자료와 정성적으로 비교하여 타당성을 확인하였으며 기간을 확장하여 추가 분석중이다. 또한 AAFOS의 관측 불확도를 정량적으로 평가하기 위하여 인공기후실을 이용한 서리 생성 및 관측 실험을 수행중이다(Table 2와 3 참조).

Table 2는 1분 간격 자료로 인공기후실에서 온·습도를 조절하면서 관측한 사례이다. LWmV\_Avg는 LWS-D 센서의 평균 전압이고, LWMDry\_Tot, LWMWet\_Tot, LWMFrost\_Tot는 각각 1분 단위의 건조, 습윤, 서리 시간이다. LWS\_TC\_Avg는 SI-431 센서로 관측한 LWS-D 센서의 표면온도(°C)이다. 2023-10-23 14:41 - 14:47에 이슬, 그 이후에는 서리가 관측되었다.

Table 3은 1일 간격 자료로 습윤환경과 DTS, WTS 등의 일별 변화를 확인할 수 있다. 1일 간격 자료에는 1분 간격 변수에 추가적으로 LWS\_TC\_Min, LWS\_TC\_Max, MM1\_Min, MM3, DTS, WTS, BattV\_Min, PTemp\_C가 기록되었다. 각각 일별 표면온도 최저값, 표면온도 최고값, 일별 LWS-D 최저 전압, 지난 3일간 LWS-D 최저 전압, 건조임계값, 습윤임계값, 배터리 전압, 데이터로거 온도(°C)이다. 관측 3일차까지는 건조임계값(DTS)이 제조사 기본값인 274 mV를 유지한 후 4일차에 이전 3일간 MM1\_Min 값 중 가장 작은 값 + 7 mV 값으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. WTS는 앞서 서술된 바와 같이 DTS + 10 mV이다. LWMDry\_Tot, LWMWet\_Tot, LWMFrost\_Tot는 각각 건조, 습윤, 서리 시간(단위: 분)으로 일별 DTS와 WTS 값을 이용하여 판단된다. 일별 자료에서 한 가지 유의할 점은 첫 칸에 표시된 날짜는 자료의 기록 날짜이고 실제 관측은 그 이전 24시간 동안 이루어진다는 것이다. 즉, 2023-10-18 0:00로 기록된 줄의 자료는

2023-10-17 0:01부터 2023-10-18 0:00 (=2023-10-17 24:00)까지 10초 간격으로 8640회 관측된 자료를 처리한 값들이다. 이는 1분 간격 자료에서도 마찬가지인데, 예를 들어 14:47분으로 기록된 줄의 자료는 14:46:10초부터 14:47:00초까지 10초 간격으로 6회 관측된 자료를 처리한 값들이다.

## V. 고찰 및 결론

본 연구에서는 농업서리를 자동으로 관측할 수 있는 시스템을 제시하였다. 기존의 엽면습윤센서를 이용한 서리관측 방법이 갖고 있던 센서 오염과 환경 습도 변화에 따른 기준 전압값의 장기 변동성 문제를 자동적으로 해결할 수 있도록 알고리즘을 구현함으로써 관측 안정성을 높였다. 센서 표면의 고체 수분 존재 여부에 따라 서리 발생을 직접 관측할 수 있기 때문에 농업지역내 서리 영향이 우려되는 장소와 필요한 높이에 간편하게 설치하여 운용할 수 있을 것으로 기대된다. 관측자료는 1분 간격의 시간 고해상도 자료로서 기계학습을 이용한 서리 진단모델 개발과 이를 이용한 보다 넓은 지역에 대한 예측 정보 생산에까지 활용할 수 있을 것이다.

## 적 요

농업에서 서리는 치명적인 피해를 가져오기 때문에 관측과 예측이 매우 중요하다. 기상청 서리관측자료를 분석한 최근 보고에 따르면 기후변화에 따른 지구온난화에도 불구하고 봄철 늦서리일이 빨라지지 않았고, 서리 빈도도 감소하지 않았다. 따라서 농업 서리피해에 대비하여 위험 예상 지역에서의 서리 관측 자동화와 지속적인 운영이 중요하다. 기존에 활용되고 있는 엽면습윤센서를 이용한 서리관측은 관측센서의 오염이나 주변 환경의 습도 변화에 따라 기준 전압값이 장기간에 걸쳐 변동하는 문제가 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제를 자동적으로 해결하도록 데이터로거 프로그램으로 구현하였다. 구축된 서리자동관측시스템은 안정적으로 장기간에 걸쳐 시간 고해상도 관측자료를 축적할 수 있다. 이 자료는 향후 기계학습 방법을 이용한 서리 진단모델의 개발과 주변 지역에 대한 서리발생 예측 정보 생산에 활용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 “기상업무지원 기술개발연구-생명기상 및 농림기상 기술개발(KMA2018-00626)”의 지원으로 수행되었습니다. 논문의 가독성 향상에 큰 도움을 주신 심사자 두 분께도 감사드립니다.

## REFERENCES

- Apogee Instruments, 2020: *Owner's Manual - Infrared Radiometer* Rev: 28-Oct-2020. p. 21.
- Campbell Scientific., 2018: *LWS: Dielectric Leaf Wetness Sensor Instruction Manual* Revision 11/18. p. 13.
- Decagon Devices, 2016: *Dielectric Leaf Wetness Sensor Operator's Manual* version February 29, 2016. p. 17.
- Jo, E., H.-M. Kim, J.-Y. Shin, K. R. Kim, Y. H. Lee, and J. Jee, 2022: Characteristics and trend of spatiotemporal distribution of frost occurrence in South Korea for 21 years. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **24**(2), 83-94.
- Kim, S.-H., S.-J. Lee, S.-W. Son, S.-S. Cho, E.-S. Jo and K. R. Kim, 2022: Unmanned multi-sensor based observation system for frost detection - design, installation and test operation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **24**(2), 95-114.
- Kim, S., S.-J. Lee, and K. R. Kim, 2023: Improvement of Multiple-sensor based Frost Observation System (MFOS v2). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **25**(3), 226-235.
- KMA, 2022: *Ground Meteorological Observation Guidelines*. pp. 98-99, 113.
- Maracchi, G., O. Sirotenko, and M. Bindi, 2005: Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Climatic Change* **70**(1), 117-135.
- Savage, M. J., 2012: Estimation of frost occurrence and duration of frost for a short-grass surface. *South African Journal of Plant and Soil* **29**, 173-187.
- <https://bd.kma.go.kr/kma2020/fs/frostSelect3.do> (2023.10.18.)
- <https://help.campbellsci.com/crbasic/cr6> (2023.9.7.)



## Appendix - Datalogger program with annotation for the Automated Agricultural Frost Observation System (AAFOS)

'Automated determination of Frost/Wet threshold voltages (autofrost.cr8, krk9, 20230615-20231025) for CR800 Series (datalogger model CSI CR800)

'A practical implementation of the Korean Patent Application #10-2023-0064612

'Declare Variables and Units

Public LWmV, LWMDry, LWMWet, LWMFrost, IRR(1)

Units LWmV=mV

Units LWMDry=Minutes

Units LWMWet=Minutes

Units LWMFrost=Minutes

Alias IRR(1) = Lws\_TC

Units Lws\_TC = Deg C

'Define Data Tables

DataTable(Min01,True,-1)

  DataInterval(0,1,Min,10)

  Average(1,LWmV,FP2,False)

  Totalize(1,LWMDry,FP2,False)

  Totalize(1,LWMWet,FP2,False)

  Totalize(1,LWMFrost,FP2,False)

  Average(1,Lws\_TC,IEEE4,False)

EndTable

DataTable(Min10,True,-1)

  DataInterval(0,10,Min,10)

  Average(1,LWmV,FP2,False)

  Totalize(1,LWMDry,FP2,False)

  Totalize(1,LWMWet,FP2,False)

  Totalize(1,LWMFrost,FP2,False)

  Average(1,Lws\_TC,IEEE4,False)

EndTable

DataTable(Hour01,True,-1)

  DataInterval(0,1,Hr,10)

  Average(1,LWmV,FP2,False)

  Totalize(1,LWMDry,FP2,False)

  Totalize(1,LWMWet,FP2,False)

  Totalize(1,LWMFrost,FP2,False)

  Average(1,Lws\_TC,IEEE4,False)

EndTable

```
DataTable(Day01,True,366)
```

```
  DataInterval(0,1,Day,10)
```

```
  Average(1,LWmV,FP2,False)
```

```
  Totalize(1,LWMDry,FP2,False)
```

```
  Totalize(1,LMMWet,FP2,False)
```

```
  Totalize(1,LMMFrost,FP2,False)
```

```
  Average(1,Lws_TC,IEEE4,False)
```

```
  Minimum(1,Lws_TC,IEEE4,0,0)
```

```
  Maximum(1,Lws_TC,IEEE4,0,0)
```

```
  Minimum(1,MM1,FP2,0,0)
```

```
  Sample(1,MM3,FP2)
```

```
  Sample(1,DTS,FP2)
```

```
  Sample(1,WTS,FP2)
```

```
  Minimum(1,BattV,FP2,False,False)
```

```
  Average(1,PTemp_C,FP2,False)
```

```
EndTable
```

```
' vars for daily LWS dry/frost/wet voltage
```

```
Public MM1,MM3, Dry(3), MM1d(3), MM3d(3), AMM3, I, RecData, RecBack
```

```
Public DTS, WTS, LDIA(2), LDI
```

```
' pre-determined values for daily LWS dry/frost/wet voltage
```

```
Public DTScsi = 274      'default dry threshold mV per CSI spec (may be adjusted at site)
```

```
Const alpha = 7        'threshold mV above LDI to determine frost (LDI + alpha => DTS)
```

```
Const beta = 10        'threshold mV above DTS to determine wetness (DTS + beta => WTS)
```

```
'Main Program
```

```
BeginProg
```

```
  DTS = DTScsi
```

```
  LDI = DTS - alpha
```

```
  'Main Scan
```

```
  Scan(10,Sec,1,0)
```

```
  'initialize & load LWS-related past data
```

```
  For i = 1 To 3
```

```
    MM1d(i) = LDI : MM3d(i) = LDI : Dry(i) = 0
```

```
  Next i
```

```
  RecData = Day01.Record(1,1) 'RecData starts from 0 (zero)
```

```
  If RecData >= 2 Then RecBack = 3 Else RecBack = RecData+1
```

```
  For i = 1 To RecBack
```

```
    MM1d(i) = Day01.MM1_min(1,i) 'minimum LDI during the previous day
```

```
    MM3d(i) = Day01.MM3(1,i)    'minimum LDI during the previous 3 days
```

```
    If(Day01.LWMDry_tot(1,i) > 0) Then Dry(i) = 1 Else Dry(i) = 0
```

Next i

If RecBack >= 3 Then

AMM3 = (MM3d(1)+MM3d(2)+MM3d(3))/3

If (Dry(1)+Dry(2)+Dry(3)) > 0 Then 'more than 1 dry event

MinSpa(LDIa(), 3, MM1d()) 'LDIa(1) = minimum{MM1d(1),MM1d(2),MM1d(3)}

Else 'no dry event

LDIa(1) = AMM3

EndIf

LDI = LDIa(1)

EndIf

DTS = LDI + alpha

WTS = DTS + beta

'SI-431 Infrared Surface Temperature Sensor measurement 'Lws\_TC'

SDI12Recorder (IRR(),1,0,"MC!",1.0,0)

'LWS Dielectric Leaf Wetness Sensor measurement 'LWmV'

BrHalf(LWmV,1,mV2500,1,1,1,2500,False,10000,\_60Hz,2500,0)

LWMDry=0

LMMWet=0

LMMFrost=0

MM1 = WTS '20231025: to allow LDI jump (abrupt/large contamination)

If MM1d(1) < MM1d(2) Then MM3 = MM1d(1) Else MM3 = MM1d(2)

If LWmV<DTS Then

LWMDry=0.1666667

MM1 = LWmV

If (LWmV < MM3) Then MM3 = LWmV

Else

If Lws\_TC < 0 Then

LMMFrost = 0.1666667

Else

If LWmV>=WTS Then

LMMWet=0.1666667

Else

LWMDry=0.1666667

EndIf

EndIf

EndIf

'Default CR800 Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'

Battery(BattV)

'Default CR800 Datalogger Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp\_C'

PanelTemp(PTemp\_C,\_60Hz)

'Call Data Tables and Store Data

CallTable Min01

CallTable Min10

CallTable Hour01

CallTable Day01

NextScan

EndProg