



비닐온실 폭설 방재 예·경보 시스템을 위한 설하중 센서 개발과 적설 경보 기준 분석

Development of Snow Load Sensor and Analysis of Warning Criterion for Heavy Snow Disaster Prevention Alarm System in Plastic Greenhouse

김동수^a · 정영준^b · 이상익^c · 이종혁^d · 황규홍^e · 최원^{f, †}

Kim, Dongsu · Jeong, Youngjoon · Lee, Sang-ik · Lee, Jonghyuk · Hwang, Kyuhong · Choi, Won

ABSTRACT

As the weather changes become frequent, weather disasters are increasing, causing more damage to plastic greenhouses. Among the damage caused by various disasters, damage by snow to the greenhouse takes a relatively long time, so if an alarm system is properly prepared, the damage can be reduced. Existing greenhouse design standards and snow warning systems are based on snow depth. However, even in the same depth, the load on the greenhouse varies depending on meteorological characteristics and snow density. Therefore, this study aims to secure the structural safety of greenhouses by developing sensors that can directly measure snow loads, and analysing the warning criteria for load using a stochastic model. Markov chain was applied to estimate the failure probability of various types of greenhouses in various regions, which let users actively cope with heavy snowfall by selecting an appropriate time to respond. Although it was hard to predict the precise snow depth or amounts, it could successfully assess the risk of structures by directly detecting the snow load using the developed sensor.

Keywords: Plastic greenhouse; snow load; sensor; markov chain; alarm system

1. 서론

우리나라 농가에 설치된 온실은 크게 비닐온실, 유리온실, 경질판온실로 분류되며, 그 중 비닐온실은 시공 용이성과 비용 측면의 장점으로 인해 온실시설 중 가장 많이 이용되고 있다. 시설채소 재배를 위해 설치되어 있는 비닐온실은 2018년 기준으로 50,876 ha이며, 이는 국내 시설채소 재배면적의 99.3%에 달하는 수치이다 (MAFRA, 2019). 그러나 비닐온실

은 적설에 의한 설하중과 바람에 의한 풍하중에 취약하며, 특히 기후변화의 영향으로 발생한 폭설로 인해 상당한 농업재해가 발생하였다. 2010년부터 2019년까지 10년간 폭설로 인한 피해액은 약 2,249억 원이며 이 중 비닐온실을 포함한 사유시설의 피해액은 약 2,083억 원으로 대부분을 차지하고 있다 (MOIS, 2020). 구체적인 폭설 피해 현황으로는 2010년 1월 중부지방을 중심으로 1937년 관측 이래 가장 큰 적설량을 보여 경기 및 강원 지역 비닐온실 131 ha가 파손되었고, 2014년 2월에는 동해안 지방에 장기간 폭설이 발생하여 농축산시설 82 ha가 파손되었으며 이 중 비닐온실 피해면적은 41 ha에 달하였다 (KMA, 2020).

폭설, 강풍 등 기상재해에 대한 대응책으로 2007년 원예·특작시설 내재해 설계기준이 제정되어 운영되고 있으며, 농림축산식품부는 내재해형 비닐온실시설 규격 35종 (단동 19종, 연동 5종, 광폭 8종, 과수 3종)에 대한 설계도·시방서를 제공하고 지역별로 내재해 설계기준 안전적설심을 고시하고 있다 (MAFRA, 2014). 그러나 내재해형 비닐온실이 설치된 면적은 2018년 기준 전체의 44.4% 수준으로, 과거와 비교하면 비율이 증가하는 추세이나 여전히 기존 규격시설 (농가지도형, 농가보급형)이 전체의 55.6% 수준으로 더 많은 실정이다 (MAFRA, 2019). 내재해형 규격 고시 이전 설치된 농가지

^a MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^c PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^d PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^e PhD, Researcher, STA Corporation Ltd

^f Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4715, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: fembem@snu.ac.kr

Received: January 24, 2021

Revised: January 26, 2021

Accepted: March 8, 2021

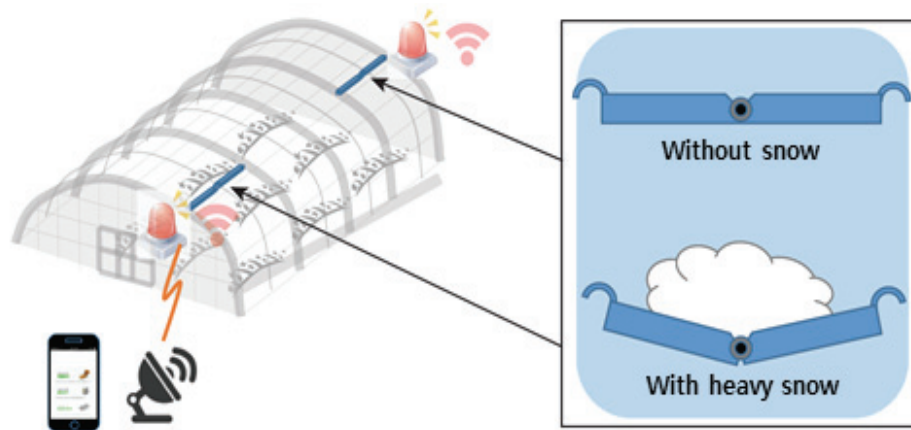


Fig. 1 Installation and operation principle of snow load sensor for greenhouse

도형 및 농가보급형 비닐온실은 기상재해에 대한 고려가 부족하여 매년 대규모의 피해복구액이 발생하는 원인으로 분석되고 있다 (Choi et al., 2014; Nam and Kim, 2009; Lee et al., 2005).

비닐온실의 폭설 피해가 지속적으로 발생하는 보다 근본적인 원인은 대설 특보 발표기준, 온실 설계기준 등에서 적설심을 기준으로 반영하는데 있다. 우리나라는 기상 관측소마다 적설심 측정 장비의 계측 방식과 눈이 쌓이는 운판의 형태가 상이하여 계측값의 신뢰도가 매우 낮으며, 농가에서 직접 측정하기에는 고가의 장비로 인해 어려움이 존재한다. 또한 온실에 작용하는 설하중을 직접적으로 측정하기 위한 상용화된 장비는 존재하지 않는 실정이다. 뿐만 아니라, 구조물의 안전성 검토를 위해서는 하중 개념의 접근이 필요하나, 지금과 같은 높이 개념의 접근은 대기의 온도 및 습도, 적설심, 눈의 결정형태, 겨울철 강수량, 재결빙 여부 등 다양한 조건에 따라 변하는 눈의 밀도를 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다 (Judson and Doesken, 2000; Lee and Chung, 2019; Bormann

et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 비닐온실에 쌓이는 눈의 양을 정량적으로 파악할 수 있도록 적설심이 아닌 설하중을 직접 측정하는 센서를 개발하고, 적설 경보 기준을 수립하여 온실의 구조 안전성을 확보하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 온실 설하중 센서의 형태

눈에 의한 설하중을 측정하기 위해서는 로드셀이 주로 사용되고 있으며 적설판을 야외 지표면에 설치하여 그 무게를 직접 측정하는 방식으로 개발이 이루어졌다 (Storck et al., 2002; Lee and Kim, 2009). 그러나 온실의 경우, 지붕이 경사져있기 때문에 지표면에서 측정되는 설하중과 다른 하중이 작용되며, 비닐로 이루어져 있어 상부에 로드셀을 설치하는 것이 불가능하다. 따라서 온실에 작용하는 설하중을 직접 측정하는 센서는 시장에 존재하지 않고 있다. 대안으로 설하중 모니터링에 응용 가능한 센서는 지상의 적설을 측정하는데

Table 1 Commercialized sensors for snowfall monitoring

Sensor types	Costs (10,000 ₩)	Measuring distance (m)	Measuring time (s)	Accuracy	Interface
Haglor Vertex Laser	242~	10~900	0.5	± 0.25 m < 100 m ± 1.00 m \geq 100 m	-
Trimble LaserAce1000	230~	0~600	0.3	± 10 cm	BlueTooth
Lasercraft Contour XLRi	300~	3~800	0.33	± 15 cm	RS232C
LaserTechnology TruPulse200	110~	0~1000	0.33	Short range high reflectivity : 0.3 m Long range low reflectivity : 1.0 m	RS232C, BlueTooth
MPH AdvantageB	220~	0~600	0.33	± 15 cm	RS232C
TSPC series	128	0~15.2	-	0.086 mm (12 bit)	RS232, RS485
ODSL 9 series	120	0.05~0.65	0.002	0.01 mm	RS232, RS485

이용하는 초음파, 레이저 센서를 활용할 수 있다 (Table 1). 그러나 대체로 가격이 최소 100만 원 이상의 고가이며, 레이저 센서의 경우 작은 변위만으로 붕괴 가능성을 예측해야 하는 본 시스템에서는 센서의 오차율이 높아 정확도와 정밀도의 문제점이 있어 적용에 어려움이 있다. 또한 레이저 센서와 비교해 상대적으로 정확도가 높은 기성 초음파 센서는 측정 거리가 8~20 m 안팎으로 매우 근거리만을 조사할 수 있어 센서 설치 및 운용에 어려움이 있을 것으로 분석되었다. 따라서 센서의 가격이 대체제에 비해 저렴하면서, 온실 설하중 감지를 위한 전용 센서 개발이 필요하다.

대국민 서비스 기상청 예보 시스템의 한계점으로는, 대기 온도 및 습도 등의 기상 상태가 시간, 지역, 계절마다 상이하여 눈의 밀도가 변화하지만 이를 반영할 수 있는 시스템이 전무하다는 것이다. 특히 적설심 측정 장비의 경우 무게 개념이 아닌 높이 개념으로 적설을 계측하기에 동일한 적설심에 대해서도 환경조건에 따라 다른 하중을 유발할 수 있음을 고려하지 못하고 있다. 또한, 기상대마다 적설심을 자동 측정하는 계측 장비 방식이 레이더방식, 초음파방식, 나안방식 등으로 상이하고, 눈이 쌓이는 적설판의 형태와 재질이 콘크리트, 나무 등으로 상이하여 계측값 신뢰도가 매우 낮다.

따라서 본 연구에서 개발될 센서의 형태는 농민을 대상으로 하기에 설치비용이 저렴하고 정확한 계측이 가능하며 유지관리도 용이한 물리적 센서 형태로 개발 방향을 수립하였다. 또한, 온실마다 개별 설치를 할 수 있도록 하여 지역적 특성을 반영할 수 있도록 하였다. 개발될 센서의 설치 위치는 온실 내 서까래 상부로 하여 유지관리 및 농작업에 전혀 방해되지 않도록 하였다. 이와 더불어, 설치 지역 및 온실 형태에 따라 센서 감도를 조절할 수 있는 단계별 변환 스위치를 탑재하여 개발 센서의 범용성을 높이도록 하였다. 최종적으로 온실의 서까래 사이에 센서를 설치하도록 하고, 적설의 하중이 증가하면 센서에 신호가 전달되어 정보 신호를 발생하는 원리를 최종 센서의 형태로 결정하였다 (Fig. 1).

2. 마코프 체인을 이용한 적설 자료의 확률적 통계분석

가. 적설 예측과 마코프 체인

본 연구에서 개발한 온실 설하중 센서를 활용하여 폭설 피해를 예방하기 위한 예·경보 시스템을 구성하기 위해서는 적설 정보 기준의 수립이 필요하다. 설하중 센서를 통해 측정된 비닐온실에 작용하는 하중이 특정 기준을 초과할 경우 사용자에게 알림이 제공될 수 있도록 해야 하며, 이를 위해 적설에 관한 확률론적 해석으로 정보 기준을 분석하고자 하였다. 그동안 적설량을 예측하고자 하는 연구는 다양하게 수행되어왔는데, Roebber et al. (2003)과 Kim et al. (2013)은 인공신경망 모형

을 이용하여 확률적설량을 산정하였으며, Byun et al. (2008)은 기상예측모델 WRF (Weather Research and Forecasting)을 활용하여 예측한 강수량으로부터 적설심을 도출할 수 있는 방안을 제시한 바 있다. 그러나 이들은 단순 적설량에 관한 해석으로, 구조물에 실질적으로 영향을 미치는 설하중과 지역적 특성에 관한 고려는 미비하였으며, 빙도 개념의 접근법으로 비교적 장기간에 발생할 수 있는 최대적설 혹은 확률적설에 관한 분석에 초점을 맞추었다. 따라서 본 연구에서는 폭설 예·경보에 활용할 수 있도록 재해에 능동적으로 대응할 수 있는 단기간의 시간을 고려하여 확률론적 통계 기법을 적용하고자 하였다.

비교적 단기간의 기상 예측과 재해 예보를 위해서는 마코프 체인 (Markov chain) 확률모형이 활발하게 활용되었다 (Yapo et al., 1993; Gui & Shao, 2017; Lee et al., 2020). 특히 Jimoh & Webster (1996)는 마코프 체인 모형을 이용하여 일별 강수량에 대해 해석한 바 있으며, Carpinone et al. (2010)은 빠르게 변화하는 단기적 풍속을 예측하기 위해 마코프 체인을 활용하였다. 폭설 피해를 예방하기 위해서는 적설이 발생하는 비교적 짧은 기간 동안 대응하기 위한 충분한 시간이 확보되어야 하며, 마코프 체인을 단기적 기상 예측에 이용할 수 있기 때문에 이를 적용하여 비닐온실의 적설 정보 기준을 수립하였다.

마코프 체인은 Andrey Markov가 제시한 특정 성질을 만족하며 시간에 따른 상태 변화를 나타내는 확률과정의 일종이다. 미래의 상태가 과거 상태와는 독립적으로 주어진 현재 상태에 의해서만 결정되는 특성을 가지며, 개별적 사건이 이전 기의 사건에만 영향을 받으며 발생하는 변화의 확률을 나타내는 모형이다. 구간 i 에서 특정 시간간격 이후 구간 j 로 변화하는 확률을 추이확률 (transition probability), $Pr(j|i) = P_{i,j}$ 라 할 때, 추이행렬 (transition matrix) 혹은 마코프 행렬 (Markov matrix)은 i 번째 행과 j 번째 열의 요소로 $P_{i,j}$ 를 가지는 행렬이며, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,j} & \dots & P_{1,k} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,j} & \dots & P_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i,1} & P_{i,2} & \dots & P_{i,j} & \dots & P_{i,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{k,1} & P_{k,2} & \dots & P_{k,j} & \dots & P_{k,k} \end{bmatrix} \quad (1)$$

where P is the Markov matrix with the probabilities of change of states after a specific time interval, and $P_{i,j}$ is the transition probability that represents the probability of changing from state i to state j after a specific time interval.

구간 i 를 출발하여 다음 기에 모든 구간에 도달할 확률의 합은 1이어야 하며 이를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^k P_{i,j} = 1 \quad (2)$$

본 연구에서는 마코프 체인을 이용하여 현재의 적설이 1시간 혹은 특정 시간간격 이후에 어떻게 변화하는지를 해석하고자 하였다. 이를 위해 지역별 적설 자료를 수집하여 현재 적설심 자료가 해당하는 구간이 1시간 후에 다른 구간에 도달할 확률을 산정하여 추이행렬을 구성하였다. 이때 시계열 자료인 적설심에 대해 마코프 체인 분석을 수행하기 위해서는 이를 이산화된 구간들로 나누는 군집분석을 수행해야 하며, 본 연구에서는 K-평균 알고리즘을 활용하였다. 적설심 자료는 작은 값에 대해 높은 빈도를 나타내는 분포를 가지고 있기 때문에, 군집분석을 통하여 이산화뿐만 아니라 구간별 범위를 설정함으로써 마코프 체인의 신뢰성을 확보한다. K-평균 알고리즘은 각 군집과 거리 차이의 분산을 최소화하는 방식으로 주어진 자료를 k 개의 군집으로 나누는 알고리즘이다. 이를 통해 각 군집 내에서 거리 차이의 제곱합을 최소로 하는 군집 S 를 찾을 수 있으며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_k\} \quad (3)$$

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^k SSW_i \right) = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 \right) \quad (4)$$

where S is the set of clusters, SSW_i is the sum of squared distances within a cluster, and μ_i is the center of the i th cluster.

나. 적설에 따른 온실 위험성 평가

본 연구에서는 상대적으로 낮은 안전설계기준을 가지는 농가지도형 온실과 우리나라에서 대표적으로 사용되고 있는 농가보급형 온실을 대상시설로 선정하였다. 농가지도형 A-1 온실의 경우 7.9 cm, 농가보급형 1-2W 온실의 경우 19.0 cm의 안전적설심 설계기준을 가진다 (MAFRA, 2014). 또한 비교적 평이한 수준의 적설이 발생하는 서울과 많은 적설이 발생하는 대관령을 대상지역으로 선정하고, 기상청으로부터 2002년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지의 시계열 적설심 기상자료를 수집하였다. 해당 분석 기간 중 10월부터 이듬해 4월까지의 기간을 제외하고는 눈이 오지 않았기 때문에 적설이 존재하는 10월부터 다음해 4월까지의 자료만을 사용하였다. 두

Table 2 Descriptive statistics of snow depth data for 2002–2019

Month	Seoul		Daegwallyeong	
	Maximum (cm)	Average (cm)	Maximum (cm)	Average (cm)
January	28.5	4.2	81.6	19.9
February	16.5	5.0	123.5	26.7
March	18.5	4.4	148.9	29.5
April	-	-	37.5	7.7
October	-	-	5.3	3.8
November	8.8	1.6	36.6	4.6
December	12.8	2.8	77.6	14.1
Total	28.5	3.9	148.9	21.3

지역의 적설심 자료에 관한 기술통계량은 Table 2와 같다. 서울 지역의 경우 지난 18년간 최대 28.5 cm의 적설이 발생하였으며, 대관령 지역의 경우 같은 기간 동안 최대 148.9 cm의 적설이 발생하였다. 또한 적설이 발행하였을 때 서울과 대관령에서 각각 평균 3.9 cm, 21.3 cm의 적설심이 관측되었다.

기상 특성이 상이한 두 지역에 대해 온실 종류별 설계기준을 고려하여 각각의 추이행렬을 도출하고, 이를 통하여 적설에 따른 온실의 위험성을 평가하였다. 이때 군집분석을 통해 도출되는 마지막 구간은 각 온실의 안전적설심을 초과하도록 설정하여 적설이 마지막 구간에 도달하는 경우 온실의 파괴가 발생한다고 설정하였다. 따라서 현재 적설심이 i 번째 구간에 해당될 때 1시간 뒤 마지막 k 번째 구간으로 변화할 확률인 $P_{i,k}$ 를 현재 적설심에 따른 1시간 뒤의 온실 파괴확률로 설정하였다.

또한 1시간 간격의 추이행렬을 이용하여 특정 시간간격 이내의 온실 파괴 위험성을 평가하였다. 이때 사용자가 능동적으로 폭설에 대응하기 위한 시간간격과 온실의 파괴확률에 관한 분석으로 적설 경보 기준을 수립하였다. P^n 은 앞서 도출된 추이행렬 P 를 n 번 거듭제곱하여 도출되는 n 시간 후의 추이행렬로, $P_{i,j,n}$ 을 요소로 갖는다. 즉, $P_{i,j,n}$ 은 i 번째 구간을 출발하여 n 시간 뒤에 j 번째 구간에 도달할 확률이다. 이때 구간 k 를 비닐온실의 안전설계기준을 초과하는 적설이 되도록 설정한 후 j 가 마지막 구간인 k 일 경우, 설정된 안전설계기준을 초과하는 적설에 도달할 확률이기 때문에 $P_{i,k,n}$ 은 i 번째 구간을 출발하여 n 시간 뒤에 온실의 파괴가 일어날 확률이다. 이를 이용한 n 시간 이내에 온실이 파괴가 될 확률 $P_{fail,n}$ 은 아래의 식과 같이 도출된다.

$$P_{fail,n} = 1 - \prod_{m=1}^n (1 - P_{i,j,m}), (j = k) \quad (5)$$

where $P_{fail,n}$ is the failure probability of greenhouse within n -hour, and $P_{i,j,m}$ is the elements of m -squared markov matrix (P^m).

III. 결과 및 고찰

1. 온실 설하중 센서의 설계 및 제작

설하중 센서의 스위치 부분은 가볍게, 모듈에는 온습도 등의 추가된 기능을 부여할 수 있도록 통신 모듈과 스위치 부분을 분리하고자 하였다 (Fig. 2). 또한, 중앙 스위치 부분을 제외한 나머지 부분은 가벼운 재질을 사용하여, 센서 내에 탑재할 스프링의 부담을 최소화되도록 하였다. 통신 모듈에는 추가적인 환경 센서나 복수의 설하중 센서 또는 릴레이를 연결할 수 있도록 설계하여 기존 자동화 시설을 원격 자동화 시설로 확장, 실시간 환경 센서 모니터링 등 추가적인 기능부여가 가능하도록 하였다. 이와 관련하여 복수의 통신 방식 (Wi-Fi, LTE modem, Cat M1)을 지원하여 망 연결을 유연하게 하였으며, 복수의 전원 방식 (태양전지, 유선 전력)을 지원하고 배터리를 내장하여 전력 상황 모니터링도 가능하도록 하였다.

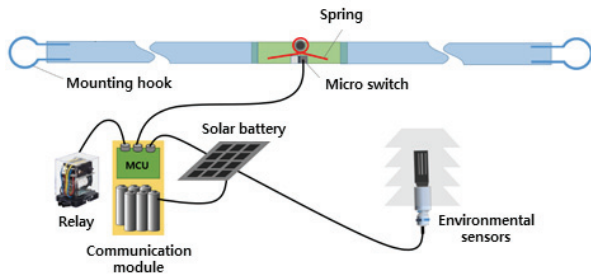


Fig. 2 Design of snow load sensor for greenhouse

거치대 부분은 가벼운 튜브 형태로 다양한 온실 서까래 간격에 따라 자르거나 연장해서 사용할 수 있도록 설계하였다 (Fig. 3). 또한, 실외의 환경을 관측하는 장치이기에, 설치의 편의성을 위해서 온실 파이프에 간단하게 거치하는 방식을 선택하였고, 온실 구조변형 신호를 보내는 센서는 사용자에게 쉽게 재설치가 가능하도록 구성하였다.

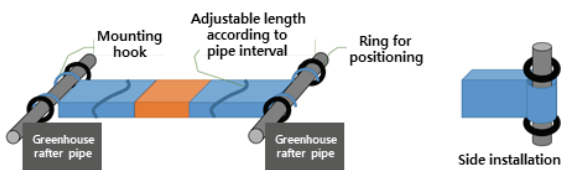


Fig. 3 Installation details of greenhouse snow load sensor

센서의 측정온도 범위는 우리나라의 여름과 겨울을 고려하여 -60°C 부터 80°C 까지 제품에 변형이 없도록 부품들을 구성하였다. 또한, 저전력 시스템을 위해서 센서 입력전원은 무전원 방식으로 설계하고 제품 자체에 공급되는 전원은 농가에서 각종 센서 등을 위하여 사용하는 5 V와 12 V DC 중 선택할 수 있도록 다양한 전원에 대응 가능하게 설계하였다. 스위치 장치의 사용 전류를 고려하여 용량이 약 1,700 mA인 AA형 알카라인 건전지 8개를 사용하였으며, 건전지 수명은 약 570 일로 계산되어 최소 1년 6개월 이상 건전지 교체 없이 충분히 유지될 수 있다. 센서의 형태는 막대형 센서로 계획되었기에 센서 본체 내부에 건전지를 삽입하도록 설계하고, 무게 배분을 위하여 전지의 관절 양쪽으로 분산하였다 (Fig. 4). 그리고 전지의 교체 시기는 일 정규 자료 전송 시 함께 보내 주도록 시스템을 구축하였다.

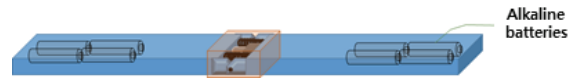


Fig. 4 Greenhouse snow load sensor using disposable batteries

센서 몸체 재질은 상대적으로 가벼운 플라스틱으로 구성하였고, 센서 감지 타입은 점접 감지 방식을 채택하였다. 센서는 비닐온실의 서까래 사이에 설치되며, 적설이 증가함에 따라 센서가 단계별로 변형되어 점접 신호가 발생하는 원리를 적용하였다 (Fig. 5). 제작된 센서의 전체적인 형태와 작동 모드는 Fig. 6과 같다.

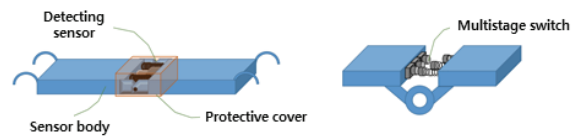


Fig. 5 Working principles of greenhouse snow load sensor



(a) Standby mode of greenhouse snow load sensor



(b) Working mode of greenhouse snow load sensor

Fig. 6 Snow load sensor for greenhouse disaster prevention alarm system

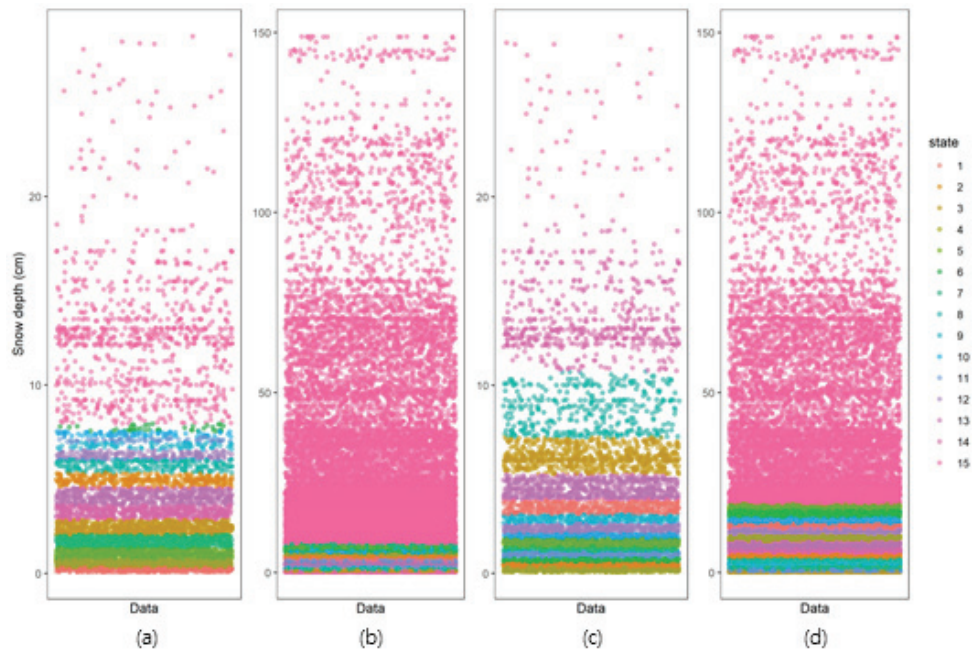


Fig. 7 Clustering analysis results using K-means algorithm (a) A-1 type greenhouse in Seoul (b) A-1 type greenhouse in Daegwallyeong (c) 1-2W type greenhouse in Seoul (d) 1-2W type greenhouse in Daegwallyeong

2. 마코프 체인을 이용한 적설 경보 기준 설정

가. 마코프 체인을 위한 군집분석 및 추이행렬 도출

서울과 대관령 지역의 적설심 자료에 대해 두 가지 온실 설계기준을 고려한 군집분석 결과는 Fig. 7과 같이 나타났다. 농가지도형 A-1 온실을 고려할 경우, 마지막 구간의 범위를 안전적설심인 7.9 cm를 초과하도록 설정하였으며, 농가보급형 1-2W 온실을 고려할 경우에는 마지막 구간 범위를 안전적설심인 19.0 cm를 초과하도록 설정하였다. 구간의 개수는 마지막을 제외한 구간들에서 자료의 개수가 적절히 분포될 수 있도록 15개로 선정하였다. 대관령 지역의 경우, 매우 큰 적설이 빈번히 발생하였기 때문에, 마지막 구간에 많은 수의 적설 자료가 포함되었다. 또한, 각각의 군집분석 결과에 대해 마코프 체인 모형을 통하여 15×15의 크기를 가지는 추이행렬을 도출하였다.

나. 온실 파괴 위험성 평가

지역별 기상 특성과 온실 설계기준을 고려한 마코프 체인 추이행렬을 이용해, 온실의 파괴 위험성을 평가하였다 (Table 3~6). 현재 적설심을 바탕으로 다양한 시간 간격 이내에 온실이 파괴될 확률을 산정하였으며, 3, 6, 9시간 이내의 파괴확률을 도시하였다. 현재 적설심이 마지막 구간에 해당되어 안전적설심을 초과할 경우에는 온실의 파괴가 일어나기 때문에 모든 마지막 구간에 대해서는 파괴확률은 1로 산정되었다. 같

은 현재 적설심에 대해 큰 눈이 자주 발생하는 대관령 지역이 서울 지역보다 더 높은 파괴확률을 나타냈으며, 더 낮은 안전

Table 3 Failure probability of farmhouse A-1 type greenhouse in Seoul

State	Current snow depth (cm)	Greenhouse failure probability		
		Within 3 hr, $P_{fail,3}$	Within 6 hr, $P_{fail,6}$	Within 9 hr, $P_{fail,9}$
1	0.1~0.3	0.0000	0.0001	0.0005
2	0.4~0.7	0.0000	0.0002	0.0009
3	0.8~1.3	0.0000	0.0002	0.0012
4	1.4~2.0	0.0001	0.0008	0.0035
5	2.1~2.8	0.0007	0.0063	0.0211
6	2.9~3.6	0.0004	0.0039	0.0140
7	3.7~4.5	0.0124	0.0472	0.1083
8	4.6~5.3	0.0224	0.0860	0.1931
9	5.4~6.0	0.0057	0.0464	0.1441
10	6.1~6.5	0.0372	0.1490	0.3315
11	6.6~6.9	0.2517	0.6409	0.8908
12	7.0~7.2	0.1888	0.5389	0.8238
13	7.3~7.5	0.2414	0.6295	0.8864
14	7.6~7.9	0.5762	0.9505	0.9984
15	8.0~	1.0000	1.0000	1.0000

Table 4 Failure probability of farmhouse A-1 type greenhouse in Daegwallyeong

State	Current snow depth (cm)	Greenhouse failure probability		
		Within 3 hr, $P_{fail,3}$	Within 6 hr, $P_{fail,6}$	Within 9 hr, $P_{fail,9}$
1	0.1~0.3	0.0001	0.0013	0.0062
2	0.4~0.7	0.0001	0.0018	0.0084
3	0.8~1.3	0.0002	0.0026	0.0131
4	1.4~2.0	0.0013	0.0129	0.0478
5	2.1~2.7	0.0022	0.0204	0.0728
6	2.8~3.3	0.0109	0.0515	0.1389
7	3.4~4.0	0.0251	0.1139	0.2804
8	4.1~4.7	0.0510	0.2069	0.4481
9	4.8~5.3	0.0916	0.3162	0.5978
10	5.4~5.8	0.0983	0.3666	0.6834
11	5.9~6.3	0.2372	0.6335	0.8945
12	6.4~6.7	0.3883	0.8169	0.9725
13	6.8~7.2	0.3643	0.7924	0.9647
14	7.3~7.9	0.3357	0.7611	0.9535
15	8.0~	1.0000	1.0000	1.0000

Table 6 Failure probability of farm supply 1-2W type greenhouse in Daegwallyeong

State	Current snow depth (cm)	Greenhouse failure probability		
		Within 3 hr, $P_{fail,3}$	Within 6 hr, $P_{fail,6}$	Within 9 hr, $P_{fail,9}$
1	0.1~0.3	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.4~0.8	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.9~1.6	0.0000	0.0000	0.0001
4	1.7~2.6	0.0000	0.0001	0.0003
5	2.7~3.7	0.0000	0.0001	0.0006
6	3.8~5.0	0.0000	0.0005	0.0018
7	5.1~6.6	0.0002	0.0019	0.0063
8	6.7~8.5	0.0059	0.0195	0.0400
9	8.6~10.4	0.0001	0.0011	0.0051
10	10.5~12.0	0.0003	0.0034	0.0142
11	12.1~13.5	0.0007	0.0068	0.0262
12	13.6~15.4	0.0172	0.0847	0.2176
13	15.5~17.2	0.0593	0.2165	0.4407
14	17.3~19.0	0.2618	0.6543	0.8973
15	19.1~	1.0000	1.0000	1.0000

Table 5 Failure probability of farm supply 1-2W type greenhouse in Seoul

State	Current snow depth (cm)	Greenhouse failure probability		
		Within 3 hr, $P_{fail,3}$	Within 6 hr, $P_{fail,6}$	Within 9 hr, $P_{fail,9}$
1	0.1~0.3	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.4~0.5	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.6~0.8	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.9~1.1	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.2~1.4	0.0000	0.0000	0.0000
6	1.5~1.8	0.0000	0.0000	0.0000
7	1.9~2.1	0.0000	0.0000	0.0000
8	2.2~2.6	0.0000	0.0000	0.0000
9	2.7~3.1	0.0000	0.0000	0.0000
10	3.2~3.9	0.0000	0.0000	0.0000
11	4.0~5.2	0.0000	0.0000	0.0001
12	5.3~7.2	0.0000	0.0002	0.0009
13	7.3~10.7	0.0001	0.0010	0.0035
14	10.8~19.0	0.0122	0.0422	0.0882
15	19.1~	1.0000	1.0000	1.0000

설계기준을 가지는 농가지도형 온실이 같은 현재 적설심에 대해 농가보급형보다 더 높은 파괴확률을 나타내었다. 또한, 시간 간격이 증가할수록 파괴확률이 증가하는 것으로 나타났다.

서울에서 현재 적설심이 5.0 cm일 때 6시간 이내에 농가지도형 온실의 경우 0.0860, 농가보급형 온실의 경우 0.0000의 파괴확률을 나타내어 온실 규격별로 파괴 위험성이 다른 것을 확인할 수 있었다. 대관령에서는 같은 현재 적설심에 대해 6시간 이내에 농가지도형 온실의 경우 0.3162, 농가보급형 온실의 경우 0.0005의 파괴확률을 나타내었으며, 눈이 많이 오지 않는 지역인 서울과 비교하여 파괴 위험성이 크게 증가하였다.

다. 폭설 방재 예·경보 시스템의 적설 경보 기준 설정

서울과 대관령 지역에 관한 현재 적설심에 따른 온실 규격별 파괴확률을 이용하여 폭설 방재 예·경보 시스템을 위한 경보 기준을 수립하였다. 이때 예·경보 시스템의 사용자 편의성과 활용성을 고려하여 두 가지 단계의 경보를 수립하고자 하였다. 이에 따라 파괴확률이 30%를 초과할 경우 ‘주의’, 50%를 초과할 경우 ‘경고’의 알람이 제공될 수 있도록 경보 기준을 설정하였다. 또한 사용자가 폭설에 능동적으로 충분히 대처할 수 있도록 9시간의 경보 시간 간격을 고려하였다.

이에 따라 경보 알람이 제공될 때 사용자가 능동적으로 위험 수준을 파악하고, 대응할 수 있도록 하였다.

농가지도형 온실의 경우, 서울에서 6.3 cm의 적설에 대해 ‘주의’, 6.8 cm의 적설에 대해 ‘경고’ 기준을 설정하였으며, 대관령에서는 4.4 cm와 5.1 cm에 대해 각각 ‘주의’와 ‘경고’ 기준을 설정하도록 하였다. 농가보급형 온실의 경우, 서울에서는 50%를 초과하는 파괴확률이 나타나지 않아 안전한 것으로 판단되었으며, 대관령에서는 16.4 cm를 ‘주의’, 18.2 cm를 ‘경고’ 기준으로 설정하였다. 본 연구에서는 사용성을 고려하여 9시간의 경보 시간간격을 고려하였지만, 사용자에게 따라 다양한 시간 간격을 고려하여 안전성을 자율적으로 반영할 수 있도록 하였다.

라. 경보 기준에 따른 설하중 센서의 반응 단계 설정

마코프 체인을 통해 수립된 적설 경보 기준에 대해 눈의 밀도를 고려하여 설하중 기반의 예·경보 시스템을 구축하고자 하였다. 국내 눈의 평균 밀도인 60 kg/m³을 고려하여 앞서 도출한 적설심 기반의 경보 기준을 단위면적당 하중으로 변환하여 설하중 센서의 반응 단계로 설정하였다 (Table 7). 서울 지역의 경우 농가지도형 온실에 대해 3.8 kg/m²의 설하중에서 ‘주의’ 알람을, 4.1 kg/m²의 설하중에서 ‘경고’ 알람이 제공되도록 설정하였다. 농가보급형 온실의 경우에는 서울에서 그동안 발생한 모든 적설에 대해 안전한 것으로 분석되었다. 대관령 지역의 경우 농가지도형 온실에 대해 2.6 kg/m²에서 ‘주의’ 알람을, 3.1 kg/m²에서 ‘경고’ 알람이 제공되도록 설정하였으며, 농가보급형 온실의 경우에는 9.8 kg/m²에서 ‘주의’ 알람을, 10.9 kg/m²에서 ‘경고’ 알람이 제공될 수 있도록 하였다. 설정된 센서 반응 단계를 기반으로 본 연구에서 개발한 설하중 센서의 스위치가 반응하도록 설정하여, 폭설 예·경보 시스템을 통해 알람이 제공될 수 있도록 하였다. 이를 통해 비닐온실의 폭설 피해를 획기적으로 예방하고, 온실의 구조안전성을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

Table 7 Reference loads per unit area for heavy snow alarm according to the level of alarm and type of greenhouse

Region	Alarm level	Reference loads per unit area for alarm (kg/m ²)	
		Farmhouse A-1 type greenhouse	Farm supply 1-2W type greenhouse
Seoul	Caution	3.8	-
	Warning	4.1	-
Daegwall yeong	Caution	2.6	9.8
	Warning	3.1	10.9

IV. 요약 및 결론

기후변화와 기상재해의 증가로 인해 비닐온실의 피해가 지속적으로 발생하고 있고 특히 폭설에 의한 피해가 계속해서 발생하고 있기에 이를 예방하기 위하여 기존의 적설심 기준이 아닌 하중 개념을 적용할 수 있는 센서를 개발하고 예·경보 시스템을 위한 경보 기준을 수립하였다. 기존의 온실 변형정보를 측정하는 방식은 대부분 압력식 센서가 이용되고 있으나, 이는 정밀도에 비하여 고가의 가격이 형성되어있어 본 연구에서는 온실 서까래 사이에 간편하게 설치하여 구조물에 작용하는 설하중을 감지하는 센서를 개발하였다. 또한, 기존에 사용되던 고가 센서의 경우 유지보수가 어려웠으나, 본 연구에서 개발한 센서는 단순한 구조로 설계하여 고장이나 유지보수의 문제를 줄이고 사용전력이 낮고 설치가 간단하도록 하여 농민들이 손쉽게 이용할 수 있도록 개발하였다. 비닐온실 설하중 센서는 몸체, 감지 센서, 센서 보호 커버 등으로 구성하였으며, 경보 장치 또는 통신 장치를 연결하여 사용할 수 있도록 하였다. 설하중 센서의 설치 간격이 다를 경우, 같은 단위면적당 하중이 가해지더라도 다른 측정값이 나타날 수 있기에, 몸체의 길이를 조절하여 다양한 온실 서까래 간격에 적용할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 별도로 다단 스위치로 설계 시, 온실구조의 변형 정도 역시 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

개발된 설하중 센서를 활용하기 위해서는 적설에 관한 확률 통계 기반의 분석을 통하여 경보 기준을 수립하였다. 이를 위해 선정된 대상지역의 적설심 자료를 이용하여 마코프 체인 모형을 구축하고, 다양한 안전적설심 설계기준을 가지는 온실을 고려하였다. 마코프 체인을 통해서 현재의 적설이 단위 시간 간격 이후에 특정 구간에 도달할 확률을 도출하여 온실의 파괴 위험성을 평가하였으며, 파괴확률의 정도를 고려하여 설하중에 관한 두 가지 단계의 경보 기준을 설정하였다. 이를 통하여 적설에 관한 확률론적 접근을 가능케 하였고, 사용자가 폭설에 능동적으로 대처할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 기존 폭설 예보와 비교하여, 지역별로 상이한 기상 특성과 다양한 온실 규격 및 안전설계기준을 반영할 수 있었다. 또한, 다양한 폭설 경보 시간을 함께 제공함으로써 기상재해에 대응하기 위한 적절한 시간을 선택하여 능동적으로 대처할 수 있게 하였다. 설하중 센서를 활용한 예·경보 시스템의 종합적 운용 방법과 안전 대책 제공에 관한 추가적인 연구 개발을 통하여 비닐온실의 폭설 피해를 획기적으로 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 한국기상산업기술원에서 시행한 ‘미래 유망 민간기상서비스 성장기술개발 사업’의 지원을 받아 수행되었음 (과제번호: KMI2018-04310).

서울대학교 4단계BK21 글로벌 스마트팜 혁신인재양성 교육연구단의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

- Bormann, K. J., S. Westra, J. P. Evans, and M. F. McCabe, 2013. Spatial and temporal variability in seasonal snow density. *Journal of Hydrology* 484: 63-73. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.01.032.
- Byun, K. Y., J. Yang, and T. Y. Lee, 2008. A snow-ratio equation and its application to numerical snowfall prediction. *Weather and Forecasting* 23(4): 644-658. doi:10.1175/2007WAF2006080.1.
- Carpinone, A., R. Langella, A. Testa, and M. Giorgio, 2010. Very short-term probabilistic wind power forecasting based on Markov chain models. *2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 107-112. doi:10.1109/PMAPS.2010.5528983.
- Choi, M. K., S. W. Yun, H. T. Kim, S. Y. Lee, and Y. C. Yoon, 2014. Field survey on the maintenance status of greenhouses in Korea. *Protected Horticulture and Plant Factory* 23(2): 148-157 (in Korean). doi:10.12791/KSBEC.2014.23.2.148.
- Gui, Y., and J. Shao, 2017. Prediction of precipitation based on weighted Markov chain in Dangshan. *Proceedings of the International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications*, 81-85. doi:10.1145/3069593.3069617.
- Jimoh, O. D., and P. Webster, 1996. The optimum order of a Markov chain model for daily rainfall in Nigeria. *Journal of Hydrology* 185(1-4): 45-69. doi:10.1016/S0022-1694(96)03015-6.
- Judson, A., and N. Doesken, 2000. Density of freshly fallen snow in the central Rocky mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81(7): 1577-1588. doi:10.1175/1520-0477(2000)081<1577:DOFFSI>2.3.CO;2.
- Kim, Y., N. Kang, S. Kim, and H. Kim, 2013. Evaluation for snowfall depth forecasting using neural network and multiple regression models. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(2): 269-280 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2013.13.2.269.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2020. 2019 Abnormal climate Report. 11-1360000-000705-01. Seoul, Korea (in Korean).
- Lee, B. Y., and H. C. Kim, 2009. Development of weight type rounded snow plate. *Atmosphere* 19(1), 1-8 (in Korean).
- Lee, H. J., and G. H. Chung, 2019. Mitigation of snow damage in Gangwon by analyzing snow density and characteristics. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 19(6): 87-91 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2019.19.6.87.
- Lee, S. G., J. W. Lee, and H. W. Lee, 2005. Development of reinforcement strategy of one-span vinyl house for reduction of damage by heavy Snow. *Proceedings of the Korean Society for Bio-Environment Control Conference* 14(2): 131-137 (in Korean).
- Lee, S. I., J. H. Lee, Y. J. Jeong, and W. Choi, 2020. Development of a structural analysis model for pipe structures to reflect ground conditions. *Biosystems Engineering* 197: 231-244. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.06.018.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2014. Standard designs and specifications for disaster resilience of horticultural facilities (in Korean).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2019. Greenhouse and protected vegetable production statistics 2018. 11-1543000-000051-10. Sejong, Korea (in Korean).
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS), 2020. 2019 Disaster Yearbook. 11-1741000-000002-10. Sejong, Korea (in Korean).
- Nam, S. W., and Y. S. Kim, 2009. Actual state of structures and environmental control facilities for tomato greenhouses in Chungnam region. *Korean Journal of Agricultural Science* 36(1): 73-85 (in Korean).
- Roebber, P. J., S. L. Bruening, D. M. Schultz, and J. V. Cortinas Jr., 2003. Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density. *Weather and Forecasting* 18(2): 264-287. doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0264:ISFBDS>2.0.CO;2.
- Storck, P., D. P. Lettenmaier, and S. M. Bolton, 2002. Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States. *Water Resources Research* 38(11), 5-1-5-16. doi:10.1029/2002WR001281.

20. Yapo, P., S. Sorooshian, and V. Gupta, 1993. A Markov chain flow model for flood forecasting. *Water Resources Research* 29(7): 2427-2436. doi:10.1029/93WR00494.